

Systeme d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique

Plan directeur

UNESCO



Commission océanographique intergouvernementale

Plan directeur de l'ITSU

Deuxième édition
avril 1999

Révision de l'édition de décembre 1989

Le Groupe international de coordination du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (GIC/ITSU) de la Commission océanographique intergouvernementale de l'UNESCO est composé d'États membres de l'ensemble de la région du Pacifique. Il s'occupe de fournir ou d'améliorer tous les éléments permettant d'atténuer les effets des tsunamis dans cette région : évaluation des risques, alertes, prévention et recherche grâce à un système de coopération et de coordination des activités à l'échelle internationale. Le présent document, qui contient la deuxième édition du Plan directeur du Système d'alerte aux tsunamis, donne un bref aperçu des tsunamis et des risques qu'ils présentent dans le Pacifique. Dans le cadre de cette information, il décrit la situation actuelle du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique en en indiquant les insuffisances et en précisant dans quelle direction il convient, selon le GIC/ITSU, d'orienter les efforts pour y remédier.

UNESCO



Commission océanographique intergouvernementale

IOC/INF-1124
Paris, juillet 1999
Original anglais

SC-99/WS/36

TABLE DES MATIÈRES

ITSU – HISTORIQUE ET ORGANIGRAMME	1
TSUNAMIS ET RISQUES LIES A CE PHÉNOMÈNE	3
Tsunamis locaux et régionaux	3
Tsunamis à l'échelle du Pacifique ou en champ lointain	4
Caractéristiques du phénomène tsunami	5
SITUATION ACTUELLE, INSUFFISANCES ET ORIENTATIONS FUTURES	7
Évaluation des risques	7
Données historiques sur les tsunamis	7
Données sur les paléotsunamis	9
Études consécutives aux tsunamis	9
Modélisation numérique	9
Alerte	11
Systèmes et centres d'alerte	11
Le Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique	12
Centre d'alerte aux tsunamis de la côte Ouest et de l'Alaska	12
Les centres japonais d'alerte aux tsunamis	13
Centres d'alerte aux tsunamis de la Fédération de Russie	14
Centre polynésien de prévention des tsunamis – CPPT	14
Le système national d'alerte aux tsunamis du Chili	15
Autres systèmes nationaux d'alerte	15
Données	17
Données sismiques	17
Données relatives au niveau de la mer	19
Données historiques sur les tsunamis et les séismes	22
Données des modèles numériques	22
Autres données	22
Communications	23
Accès aux données en temps réel	23
Diffusion des messages	23
Prévention	24
Évacuation	24
Évacuations à l'occasion de tsunamis locaux	25
Évacuation en cas de tsunamis en champ lointain	25
Éducation	26
Éducation du public	26
Formation des opérateurs de systèmes d'alerte, des responsables des secours et des décideurs	26
Aménagement du territoire	27
Ingénierie	27
Recherche	28
Structure	28
Domaines de recherche	29
Applications récentes des résultats de la recherche	31
CONCLUSIONS	32
Remerciements	33
Sigles	34

La question de l'élaboration d'un Plan directeur a été évoquée pour la première fois à Fidji, en 1982, au cours de la huitième session du Groupe international de coordination du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (GIC/ITSU). A cette réunion, le Groupe avait adopté la résolution VIII.1 dans laquelle il demandait au Secrétariat de la COI entre autres choses « d'appuyer la préparation, la publication et la diffusion d'un plan directeur ». L'appui demandé allait être fourni et un document intitulé « Tsunami – Where Next ? » a été établi et accepté à la neuvième session de l'ITSU à Honolulu (Hawaii) en 1984, comme avant-projet du Plan directeur. Dans la résolution IX.1 de l'ITSU, il était recommandé d'achever l'élaboration du projet de Plan directeur « en vue de son adoption à la dixième session ». Celle-ci s'est tenue à Sydney (Canada) en 1985 et, à cette occasion, le projet de Plan directeur a été examiné mais il n'a été approuvé sous sa forme définitive qu'à la onzième session tenue à Beijing, en 1987. Cette première édition du Plan directeur a été établie par G.C. Dohler, ancien président de l'ITSU, en coopération avec le Secrétariat de la COI, le Directeur du Centre international d'information sur les tsunamis et le Président de l'ITSU, et à partir des observations formulées par les correspondants nationaux des États membres de l'ITSU. La première édition (doc. IOC/Inf.730) est parue le 23 décembre 1989.

A sa quinzième session, tenue à Papeete (Polynésie française) en 1995, tenant compte des améliorations technologiques récentes apportées au système et des progrès de la compréhension scientifique du phénomène, le Groupe a demandé que le Plan directeur soit mis à jour et un groupe de rédaction a été créé à cet effet. Un projet de deuxième édition a été établi en vue de la seizième session de l'ITSU, organisée à Lima (Pérou), et soumis aux États membres pour recueillir leurs commentaires ainsi que d'éventuelles corrections. Et c'est sur la base de leurs contributions que la version définitive de cette deuxième édition du Plan directeur a été établie.

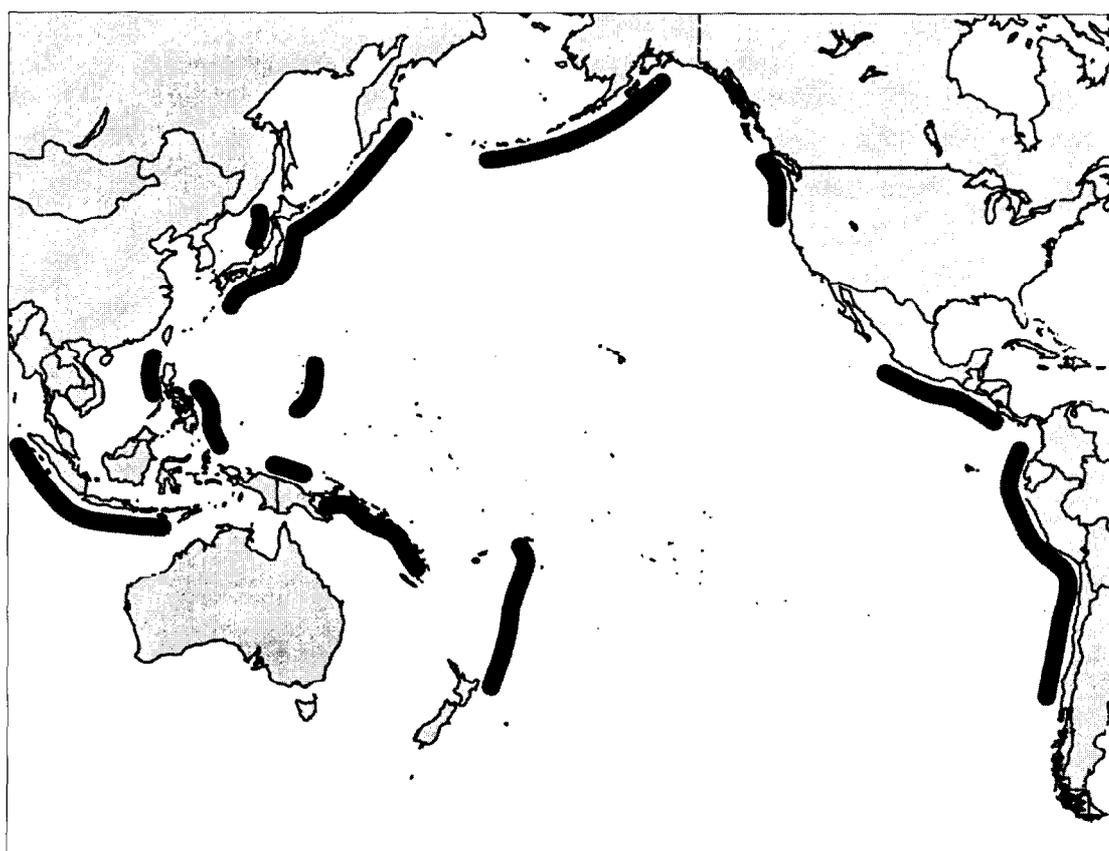
Le Plan directeur du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique est conçu comme un guide à long terme pour améliorer le Système en partant de l'analyse de ses composantes actuelles. Depuis 1987, des innovations technologiques telles que les réseaux de communication et techniques d'analyse sismique perfectionnés et l'avènement d'ordinateurs de bureau à la fois peu coûteux et très puissants avaient considérablement accru l'espoir de voir se concrétiser, au profit des États membres, les améliorations recommandées dans le Plan. Bien entendu, les perfectionnements technologiques du Système, qui présentent des avantages réels, requièrent une assistance financière et un plan d'action permettant d'obtenir et de conserver le soutien des États membres indispensable au succès de l'entreprise.

Le Plan directeur examine les insuffisances opérationnelles du Système en place et signale un certain nombre de domaines où des améliorations se révèlent nécessaires. Ainsi, en tant qu'il définit les éléments fondamentaux du Système d'alerte aux tsunamis et les améliorations nécessaires, le Plan demeure un document utile et non figé, qui peut être modifié et révisé de manière qu'il soit tiré parti des avantages associés aux progrès technologiques, de possibilités de financement imprévues et de la collaboration entre les États membres.

ITSU – HISTORIQUE ET ORGANIGRAMME

A sa troisième session (juin 1964), la **Commission océanographique intergouvernementale (COI)** a chargé son Secrétariat d'organiser, de préférence à Honolulu au début de 1965, une réunion chargée d'étudier les aspects internationaux du système d'alerte aux tsunamis en vue d'assurer la meilleure coopération internationale possible à tous les stades du fonctionnement du système d'alerte aux tsunamis : stations marégraphiques et sismologiques, communications internes et internationales, émission et diffusion des messages d'alerte. Des invitations ont été adressées à tous les États membres de la COI

ayant des intérêts dans la région du Pacifique ainsi qu'au Coast and Geodetic Survey des États-Unis d'Amérique, au Service météorologique du Japon, au Service hydrométéorologique de l'URSS, à l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), à l'Organisation météorologique mondiale (OMM), au Comité des tsunamis de l'Union géodésique et géophysique internationale (UGGI), à l'Union internationale des télécommunications et à tous les autres organismes nationaux et internationaux manifestant de l'intérêt pour la question.



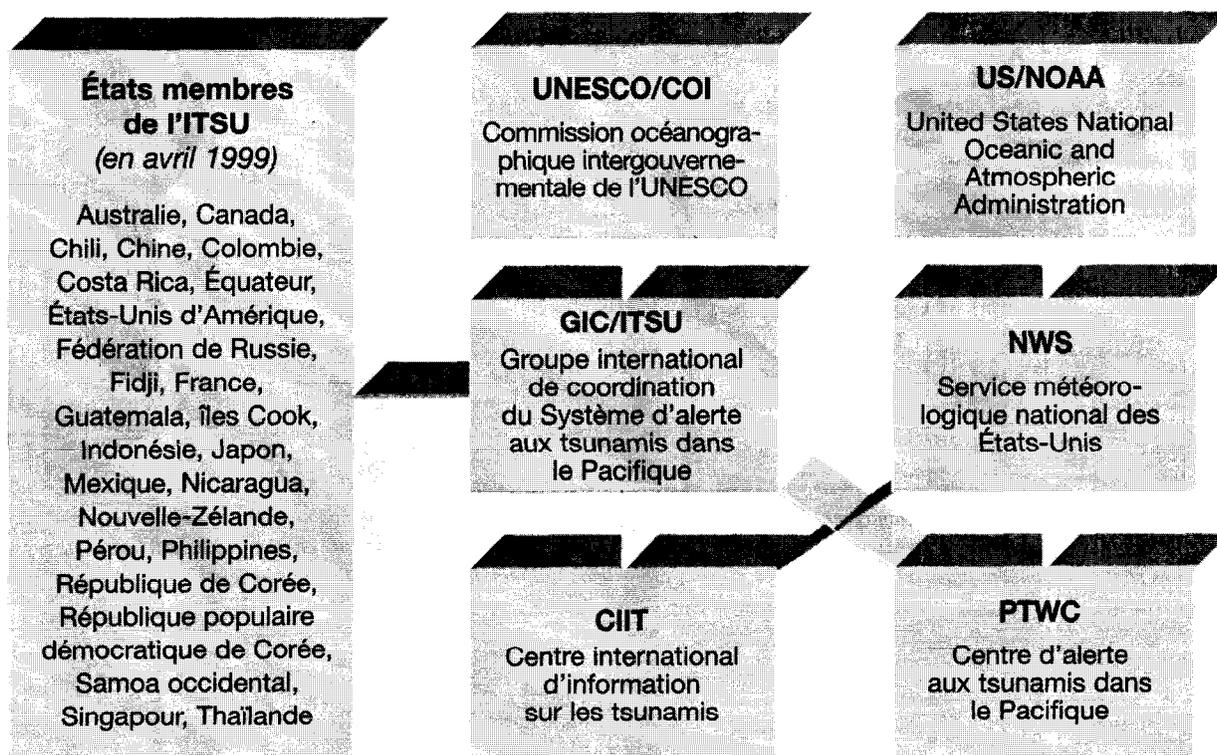
Grandes zones de séismes tsunamigènes dans la région du Pacifique. La plupart des tsunamis ne sont destructeurs que le long des côtes situées à proximité du séisme qui les a engendrés. Cependant, au cours de chaque siècle, quelques-uns sont suffisamment puissants pour faire des ravages à plusieurs milliers de kilomètres du lieu d'origine.

Un groupe de travail sur les aspects internationaux du **Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique** s'est réuni conformément à la demande de la COI au mois d'avril 1965, à Honolulu. Il a examiné la résolution III.8 de la COI, les avantages qui pouvaient en découler pour les États membres et les mesures à prendre pour diffuser en temps utile, au niveau international, des messages d'alerte aux tsunamis. A la suite de quoi, le **Groupe international de coordination du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (GIC-ITSU, ou ITSU)**, composé des États membres de la région du Pacifique, a été créé. Il est chargé de recommander des programmes particulièrement utiles aux États membres de la COI dont les côtes sont menacées par des tsunamis et d'en assurer la coordination. Pour atteindre ses objectifs et assurer le succès du projet international d'alerte aux tsunamis, l'ITSU tient à peu près tous les deux ans une réunion dans la région du Pacifique à l'invitation d'un de ces États membres. Ces réunions sont l'occasion de renforcer la coopération et la coordination entre les États membres, de faire le point des activités du Groupe depuis la réunion précédente et de définir le programme du Groupe pour la période suivante.

Parallèlement à la création de l'ITSU, la COI a accepté l'offre des États-Unis d'Amérique d'élargir

les services de leur centre d'alerte aux tsunamis à Hawaii – devenu depuis **Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (PTWC)** – pour en faire le siège opérationnel du TWSP. Elle a également accepté l'offre faite par les autres États membres d'intégrer leurs installations et moyens de communication dans le TWSP.

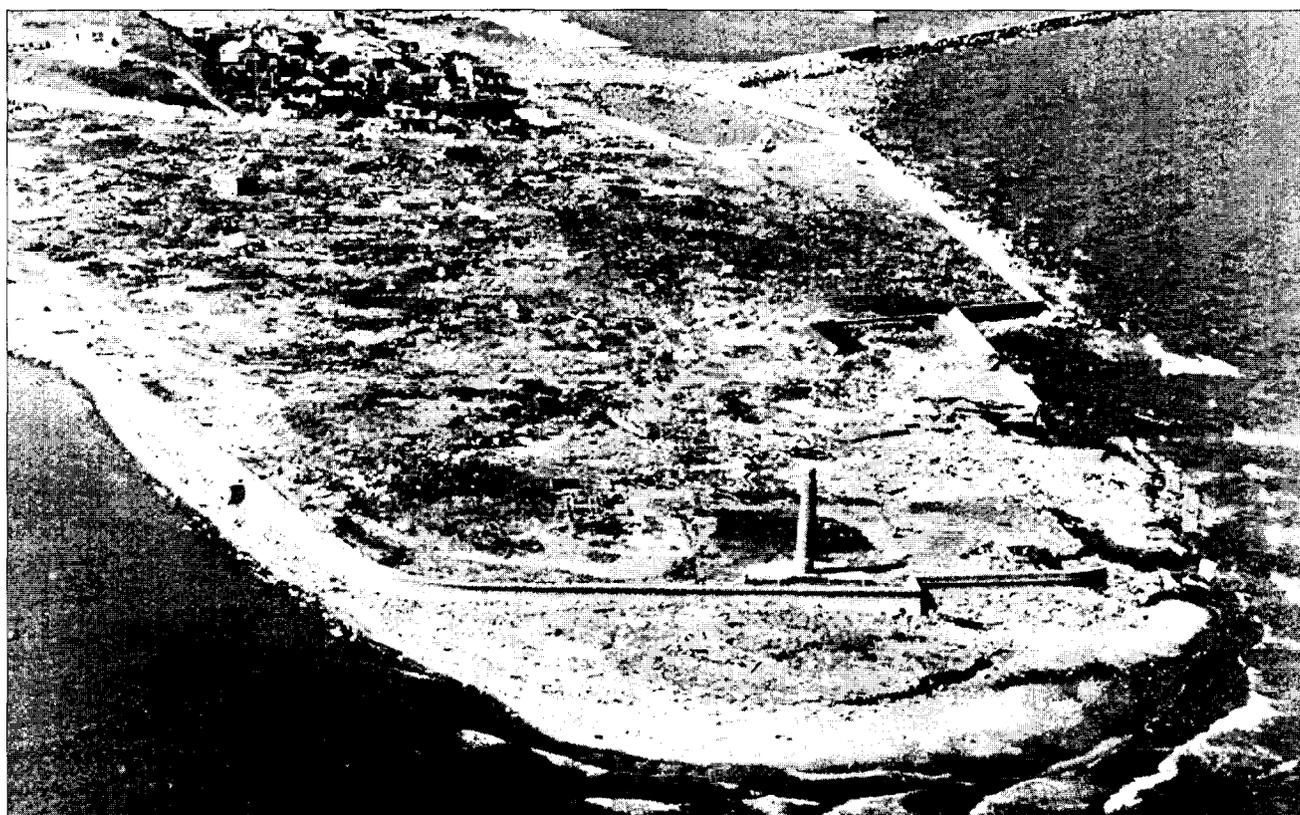
En outre, la COI a établi à Honolulu (Hawaii), dans des locaux offerts par les États-Unis d'Amérique, le **Centre international d'information sur les tsunamis (CIIT)**, à l'appui de l'ITSU et du TWSP. Le mandat du CIIT, révisé par l'ITSU en 1977, comprend six tâches essentielles : (1) surveiller le système d'alerte et recommander les améliorations à y apporter, (2) communiquer aux États membres et non membres des renseignements sur les activités du système d'alerte, du CIIT et de l'ITSU, (3) aider à mettre en place des systèmes d'alerte nationaux dans la région du Pacifique, (4) rassembler et diffuser les connaissances relatives aux tsunamis et encourager la recherche en ce domaine ainsi que l'application des résultats de cette recherche, (5) aider à diffuser tous les documents relatifs aux tsunamis et (6) fournir une aide et mettre au point des procédures pour les études consécutives aux tsunamis.



TSUNAMIS ET RISQUES LIES À CE PHÉNOMÈNE

Il y a dans la région du Pacifique des dizaines de milliers de kilomètres de côtes, appartenant à au moins 23 pays riverains et 21 États insulaires. Ces lieux connaissent une croissance rapide, marquée le plus souvent par une expansion des installations portuaires et industrielles et une augmentation quasi générale de la densité de la population. De ce fait, le nombre d'habitants, de maisons, d'immeubles et de réseaux

de transport exposés à l'assaut des tsunamis est plus grand. Depuis 1992, les grands tsunamis locaux ont fait plus de 4.200 victimes et causé pour plusieurs centaines de millions de dollars de dégâts matériels. Un tsunami à l'échelle du Pacifique aujourd'hui, tel celui qui s'est développé en 1960 au large des côtes chiliennes, peut facilement avoir des conséquences catastrophiques.



La ville d'Aonae sur l'île d'Okushiri au Japon dévastée par le tsunami régional du 12 juillet 1993.

Tsunamis locaux et régionaux

La plupart des tsunamis destructeurs sont classés comme **locaux** ou **régionaux**, ce qui signifie que leurs effets destructeurs sont circonscrits aux côtes situées dans un rayon de 100 et jusqu'à 1 000 km respectivement, de la source qui les a engendrés, généralement un séisme. Il s'ensuit que la majorité des pertes en vies humaines et des dégâts matériels causés par les tsunamis

locaux. Entre 1975 et 1998, il y en a eu au moins 18 dans le Pacifique et les mers adjacentes qui ont fait d'innombrables victimes et/ou causé d'importants dégâts matériels.

Ainsi, un tsunami régional qui s'est produit en 1983 dans la mer du Japon a dévasté les régions côtières du Japon, de la Corée et de la Russie, causant plus de 800 millions de dollars de dégâts et

faisant plus d'une centaine de victimes. Puis, après un répit de neuf ans, onze tsunamis localement destructeurs se sont produits en l'espace de sept ans, entre 1992 et 1998, faisant plus de 4 200 victimes et des centaines de millions de dollars de dégâts matériels.

Dans la plupart de ces cas, les efforts d'atténuation des effets des tsunamis déployés à l'époque n'ont pu prévenir des pertes en vies humaines et des dégâts d'une grande ampleur. On peut cependant réduire les pertes à l'avenir en densifiant le réseau de centres d'alerte et de stations sismographiques et marégraphiques, en améliorant les moyens de communication afin d'émettre des alertes en temps utile et en mettant en place de meilleurs programmes de prévention et d'éducation.

Tsunamis destructeurs locaux ou régionaux depuis 1975		
<i>Date</i>	<i>Source</i>	<i>Perte en vie humaine (estimations)</i>
29 novembre 1975	Hawaii (États-Unis)	2
17 août 1976	Philippines	8 000*
19 août 1977	Indonésie	189
18 juillet 1979	Indonésie	540
12 septembre 1979	Nouvelle-Guinée	100
12 décembre 1979	Colombie	500
26 mai 1983	Mer du Japon	100
2 septembre 1992	Nicaragua	168
12 décembre 1992	Îles de Flores (Indonésie)	1 000
12 juillet 1993	Île d'Okushiri (Japon)	230
3 juin 1994	Java (Indonésie)	222
4 octobre 1994	Île Chikotane (Russie)	11
14 novembre 1994	Philippines	74
9 octobre 1995	Manzanillo (Mexique)	1
1 ^{er} janvier 1996	Sulawesi (Indonésie)	9
17 février 1996	Irian Jaya (Indonésie)	110
23 février 1996	Pérou	12
17 juillet 1998	Papouasie-Nouvelle-Guinée	2 500

* Chiffre incluant peut-être les victimes du séisme.

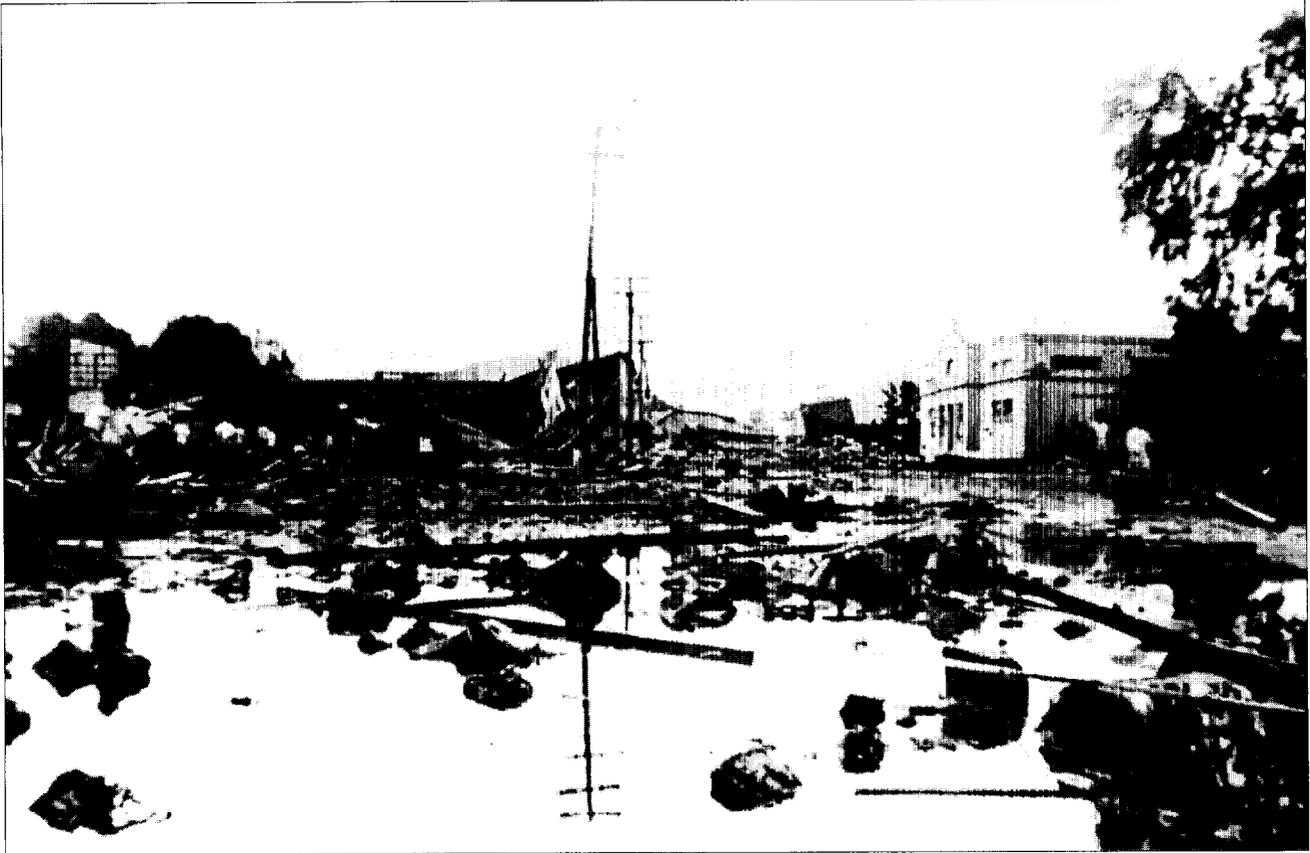
Tsunamis à l'échelle du Pacifique ou en champ lointain

Les tsunamis lointains ou à l'échelle du Pacifique sont beaucoup moins fréquents mais comportent des risques beaucoup plus grands. Ils surviennent lorsque la perturbation qui engendre le tsunami est suffisamment grande. En général, il s'agit de tsunamis locaux au point de départ qui provoquent des dégâts importants près de la source, puis les vagues continuent de se déplacer parcourant tout le bassin océanique avec suffisamment d'énergie pour provoquer d'autres pertes matérielles et humaines sur des côtes situées à plus d'un millier de kilomètres de la source. Au cours des deux derniers siècles, il y a eu au moins 17 tsunamis destructeurs à l'échelle du Pacifique.

Parmi les tsunamis de ce type, le plus destructeur de ces derniers temps a été provoqué par un grand séisme au large de la côte du Chili, le 22 mai 1960. Toutes les villes côtières de ce pays situées entre le 36^e et le 44^e parallèle ont été soit détruites, soit gravement endommagées sous l'effet du tsunami et du séisme. Le bilan de ces deux phénomènes réunis est de 2 000 morts, 3 000 blessés, 2 000 000 de sans-abri et 550 millions de dollars de dégâts. Au

large de la ville côtière de Corral, au Chili, les vagues ont atteint, selon les estimations, près de 20,4 mètres de haut. Le tsunami a fait 61 victimes à Hawaii, 20 aux Philippines et plus d'une centaine au Japon. Les dégâts ont été estimés à 50 millions de dollars au Japon, 24 millions à Hawaii et plusieurs millions encore le long de la côte ouest des États-Unis et du Canada. Loin de la source, les vagues réduites à de légères oscillations dans certaines zones ont atteint 12,2 mètres à l'île Pitcairn, 10,7 mètres à Hilo (Hawaii), et 6,1 mètres en certains endroits du Japon.

Aucun grand tsunami destructeur n'est survenu à l'échelle du Pacifique depuis que l'ITSU et le TWS ont été créés et que le PTWC a commencé à faire fonction de centre international d'alerte pour ce type d'événements. Des efforts soutenus pour améliorer tous les aspects du système d'alerte n'en demeurent pas moins nécessaires pour réduire au minimum les dégâts matériels et protéger les vies humaines lors de la survenue inévitable du prochain tsunami.



Destructions causées sur le front de mer de Hilo (Hawaii) par le tsunami né au large de la côte de l'île d'Unimak en Alaska (États-Unis) le 1^{er} avril 1946, et qui a balayé le Pacifique.

Caractéristiques du phénomène tsunami

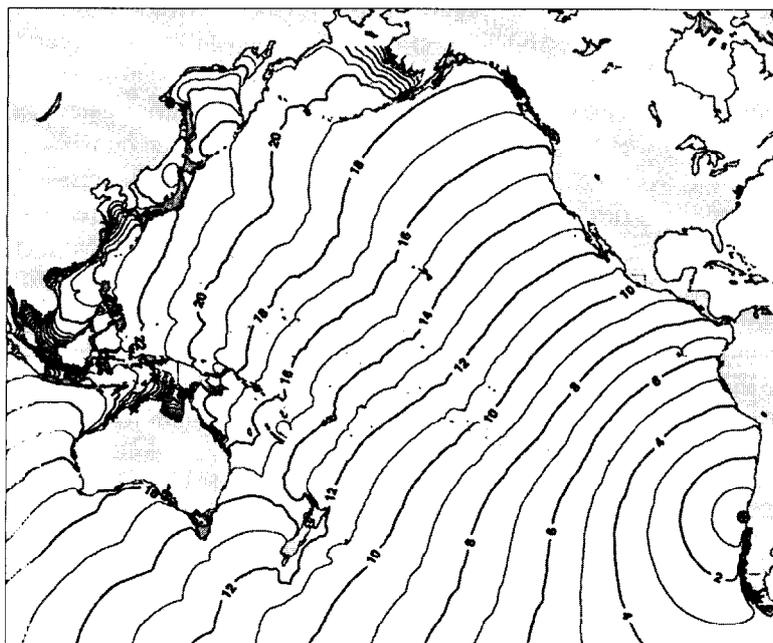
Un tsunami est un système d'ondes de gravité océanique qui se forment à la suite d'une grande perturbation de la mer intervenant dans un laps de temps relativement court. Lors du processus par lequel l'eau de mer revient, par la force de gravité, à une position d'équilibre, une série d'oscillations se produisent à la fois au-dessus et en dessous du niveau de la mer, et des vagues sont engendrées qui se propagent à partir de la région d'origine. La plupart des tsunamis sont provoqués par des séismes, le déplacement vertical de la colonne d'eau étant généralement dû à un déplacement tectonique vertical du fond marin le long d'une zone de fracture dans la croûte terrestre située sous le bassin ou en bordure. Dans le cas des plus grands séismes tsunamigènes, une superficie de 100 000 km² ou plus de fond marin peut subir un déplacement vertical de plusieurs mètres, voire plus. Les autres mécanismes de déclenchement sont les éruptions volcaniques se produisant sous l'océan ou à proximité, le déplacement des sédiments sous-marins, les glissements de terrain côtiers qui s'enfoncent dans l'eau ou les grandes explosions provoquées par l'homme ou l'impact d'un météorite.

Le tsunami se propage à partir de la région d'origine sous la forme d'une série de vagues. Sa vitesse dépend de la profondeur de l'eau et, en conséquence, les vagues subissent des accélérations ou des décélérations selon que la profondeur du fond marin au-dessus duquel elles passent croît ou décroît. De ce fait, le sens de propagation de la vague varie également et l'énergie de la vague peut être focalisée ou défocalisée. En haute mer, les vagues peuvent progresser à des vitesses allant de 500 à 1 000 kilomètres par heure. Près des côtes, cependant, le tsunami ralentit, et sa vitesse ne dépasse guère quelques dizaines de kilomètres par heure. La hauteur d'un tsunami est aussi fonction de la profondeur de l'eau. Un tsunami haut d'à peine un mètre en plein océan peut atteindre des dizaines de mètres près des côtes. Contrairement aux vagues ordinaires dues au vent, qui se réduisent à une perturbation de la surface de l'eau, la vague d'un tsunami étend son énergie jusqu'au fond de la mer. Près du rivage, cette énergie est concentrée dans le sens vertical par la diminution de la profondeur de l'eau et, dans le sens horizontal par un raccourcissement de la

longueur d'onde dû au ralentissement de la vague. Les tsunamis ont des périodes (durée du cycle d'une vague) qui peuvent aller de quelques minutes jusqu'à une heure ou plus.

Lorsqu'il atteint la côte, le tsunami revêt diverses formes selon la taille et la période des vagues, la bathymétrie littorale et la forme de la ligne de côte, l'état de la marée et d'autres facteurs. Dans certains cas, le tsunami provoque seulement une inondation relativement bénigne des régions côtières basses, submergeant les terres comme une marée qui monte rapidement. Dans d'autres, il déferle tel un mascaret – un mur vertical d'eau turbulente qui peut être très destructeur. Dans la plupart des cas, il se produit également une baisse du niveau de la mer, avant l'arrivée des vagues du tsunami ou entre deux crêtes, qui entraîne un recul de la ligne de côte allant parfois jusqu'à plus d'un kilomètre. Enfin, des courants forts et inhabituels accompagnent parfois les tsunamis, même petits.

Les dégâts causés par les tsunamis sont le résultat direct de trois facteurs : inondation, impact des vagues sur les ouvrages et érosion. Des courants forts engendrés par des tsunamis ont rongé les fondations de ponts et de digues dont ils ont provoqué l'effondrement. Les forces de traînée et la flottabilité ont déplacé des maisons et renversé des wagons. La force des vagues déchaînées par les tsunamis a démolit des constructions à ossature et autres ouvrages. Les débris flottants, y compris les bateaux et voitures qui se transforment en projectiles dangereux pouvant s'écraser sur les immeubles, les jetées et d'autres véhicules provoquent à leur tour des dégâts considérables. Des bateaux et des installations portuaires ont été endommagés



Tsunamis destructeurs à l'échelle du Pacifique depuis 1800

Date	Source	Perte en vie humaine (estimations)
20 février 1835	Chili	2
7 novembre 1837	Chili	62
13 août 1868	Chili	25 000*
10 mai 1877	Chili	500
15 juin 1896	Sanriku (Japon)	22 000
31 janvier 1906	Colombie-Équateur	500
17 août 1906	Chili	-
7 septembre 1918	Îles Kouriles (Russie)	47
11 novembre 1922	Chili	100
3 février 1923	Kamchatka (Russie)	2
2 mars 1933	Sanriku (Japon)	3 000
1 ^{er} avril 1946	Îles aléoutiennes (EU)	179
4 novembre 1952	Russie	-
9 mars 1957	Îles aléoutiennes (EU)	5
22 mai 1960	Chili	2 000
28 mars 1964	Alaska (EU)	112
4 février 1965	Îles aléoutiennes (EU)	-

* Chiffre incluant peut-être les victimes du séisme.

sous l'effet de la vague engendrée par des tsunamis même faibles. Les incendies provoqués par le déversement d'hydrocarbures ou la combustion de navires endommagés dans les ports, ou par la rupture d'installations de stockage et de raffinage de pétrole situées sur la côte peuvent causer des dégâts plus importants que ceux qui sont directement dus aux tsunamis. La pollution par les produits chimiques et par les eaux usées peut causer d'autres dégâts secondaires. Les dommages que subissent les installations d'admission, d'évacuation et de stockage peuvent également être sources de danger. L'effet potentiel du phénomène de retrait du tsunami, qui fait qu'en se retirant les eaux découvrent les admissions d'eau de refroidissement desservant des installations nucléaires, est particulièrement préoccupant.

Temps de parcours (en heures) du tsunami du 22 mai 1960, né au large du Chili, qui a traversé le bassin du Pacifique. Extrêmement destructeur le long de la côte chilienne, ce tsunami a aussi causé d'importantes destructions et pertes en vies humaines jusqu'à Hawaii et au Japon. L'inquiétude et la prise de conscience qu'a suscitées un tsunami d'une telle ampleur ont finalement conduit à la création du TWSP et de l'ITSU.

SITUATION ACTUELLE, INSUFFISANCES ET ORIENTATIONS FUTURES

Le TWSP continue de gagner en envergure et en responsabilités à mesure que le GIC/ITSU, qui compte désormais 25 États membres, se développe et s'y intéresse. Le nombre sans précédent de tsunamis localement destructeurs qui se sont produits ces dernières années a suscité un regain d'intérêt pour les tsunamis et le TWSP dans tout le bassin du Pacifique et au-delà.

La section ci-après décrit brièvement le système d'atténuation des risques liés aux tsunamis dans le Pacifique tel qu'il existe actuellement, ses insuffisances et les orientations à suivre et domaines à étudier pour y remédier. Le Système actuel est le fruit d'efforts individuels, ainsi que des efforts conjugués des États membres de l'ITSU et de l'ensemble du Groupe international de coordination. Bien que de nombreuses lacunes subsistent, de gros progrès ont été faits depuis la création de l'ITSU en 1965 pour atténuer davantage les risques liés aux tsunamis dans le Pacifique.

Un document intitulé Rassemblement de données et d'informations en vue de l'élaboration d'un Plan directeur, présenté et approuvé à la neuvième session de l'ITSU en 1984, définissait cinq grands domaines généraux de travail auxquels devaient s'atteler les programmes de l'ITSU. En termes simples, il s'agissait : (1) de préparer du matériel éducatif sur les tsunamis ; (2) de collecter et compiler des données historiques sur les tsunamis et d'élaborer de meilleures techniques d'utilisation des données historiques, des données sismiques et de la modélisation afin de lancer des alertes et de prévoir le déferlement des tsunamis (runup) ; (3) d'installer de meilleures

voies de transmission pour les données en temps réel et la diffusion des alertes ; (4) de mettre au point un meilleur matériel et de meilleures techniques de collecte et de traitement des données sismiques et des données relatives au niveau de la mer, d'implanter de nouvelles stations de collecte de données là où il le fallait et de former du personnel capable d'installer et d'entretenir le matériel et les stations ; et (5) d'améliorer les centres d'alerte aux tsunamis existants et d'en créer de nouveaux là où c'était nécessaire, ainsi que d'assurer le transfert de technologie, la formation et la documentation qui allaient de pair. Ces domaines d'étude restent valables et sont discutés ci-après dans le contexte d'un modèle conceptuel de plan d'atténuation des risques liés aux tsunamis.

Pour atténuer les risques liés aux tsunamis, ou d'ailleurs, à l'arrivée soudaine de n'importe quelle catastrophe naturelle, il est indispensable d'évaluer précisément la nature de la menace encourue, de concevoir et de mettre en œuvre des méthodes d'alerte et de préparer les régions menacées à prendre les mesures appropriées pour réduire l'impact du phénomène. Ces trois étapes essentielles : (1) *évaluation du risque*, (2) *alerte* et (3) *prévention*, sont les principaux éléments du modèle d'atténuation des risques et peuvent servir à identifier, mettre au point et classer la plupart des activités nécessaires pour diminuer efficacement les inévitables conséquences des tsunamis. Un autre élément essentiel qui n'intervient pas directement dans l'atténuation des risques, mais qui vient renforcer les activités en la matière, est la **recherche** sur les tsunamis.

Évaluation des risques

Pour atténuer efficacement les risques, il faut tout d'abord les évaluer, c'est-à-dire procéder, pour chaque communauté côtière, à une évaluation du risque de tsunami afin d'identifier les populations et les biens en danger, ainsi que la gravité du risque. Cette évaluation exige la connaissance préalable des sources potentielles de tsunamis, de la probabilité de les voir se manifester, des caractéristiques des tsunamis qu'elles génèrent en différents points de la côte. Pour certaines communautés, les données relevées lors de tsunamis antérieurs peuvent aider à chiffrer ces facteurs. La plupart toutefois n'ont que très peu de données relatives au passé, voire pas du tout. Des modèles numériques d'inondation par les tsunamis

peuvent alors donner une estimation des régions qui seront inondées en cas de séisme tsunamigène en champ proche ou lointain. Les résultats de cette évaluation sont également essentiels pour motiver la conception des deux autres facteurs d'atténuation des risques, à savoir l'alerte et la prévention.

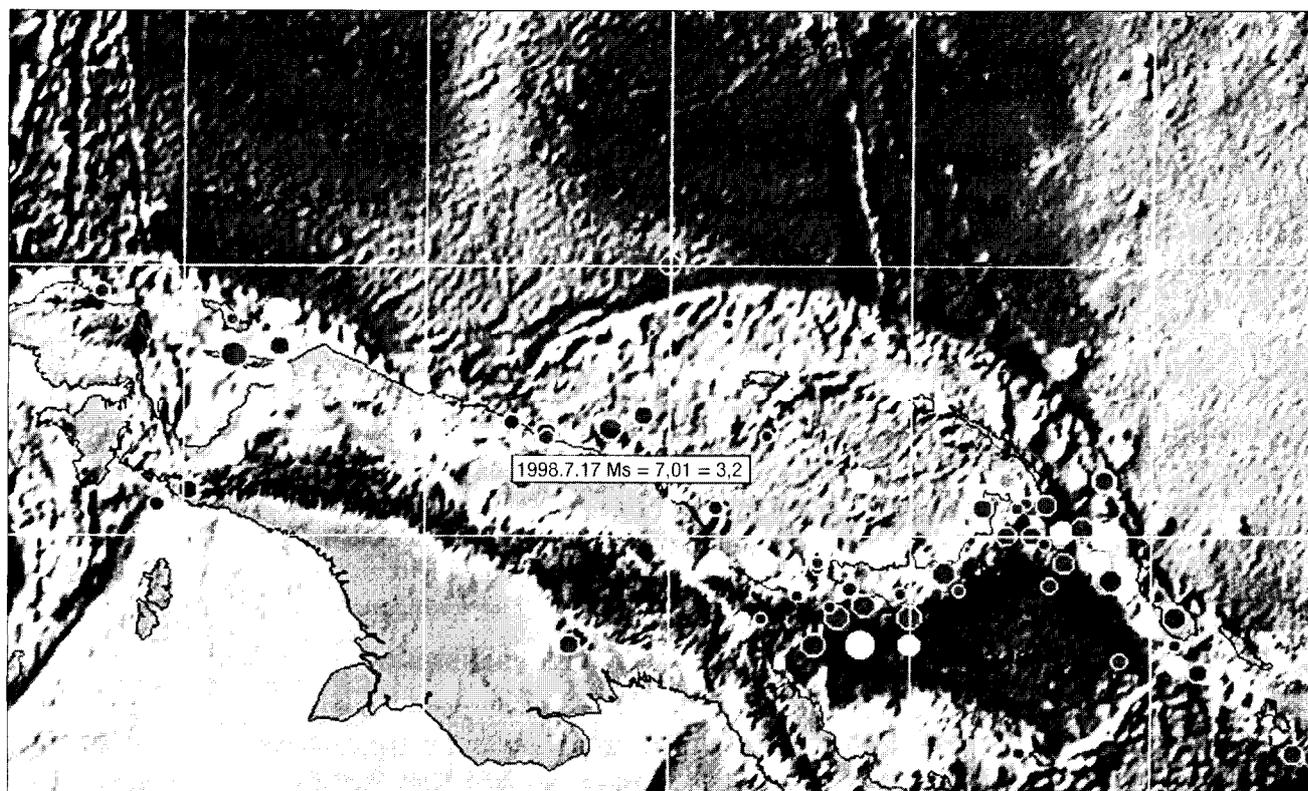
Données historiques sur les tsunamis

Il existe de nombreuses formes de données historiques disponibles en maints endroits. Il peut s'agir de catalogues publiés et manuscrits répertoriant les tsunamis, de rapports d'enquête sur le terrain, de comptes rendus personnels d'expérience, d'articles de journaux et de films ou d'enregistrements vidéo.

L'une des plus grandes collections de ce type est conservée par le Centre international d'information sur les tsunamis d'Honolulu, Hawaii. Le Centre mondial de données-A (WDC-A), qui se trouve dans les mêmes locaux que l'US National Geophysical Data Center à Boulder, Colorado, en conserve une autre collection. L'un et l'autre peuvent fournir sur commande des catalogues des tsunamis historiques ayant frappé les États-Unis d'Amérique, le Mexique, le Pérou, le Chili et d'autres endroits du Pacifique, une base de données mondiale des tsunamis historiques, une carte murale en couleurs des tsunamis historiques, certains marégrammes historiques et trois séries de diapositives sur les tsunamis. Des universités et divers organismes gouvernementaux conservent également d'autres données sur les tsunamis historiques. Plusieurs États membres, parmi lesquels l'Australie, le Chili, le Mexique, l'Équateur, le Japon et la Fédération de Russie ont également établi des catalogues des tsunamis ayant frappé leurs rivages ou des rivages proches. La Fédération de Russie, encouragée et partiellement soutenue en cela par l'ITSU, a mis au point un programme pour ordinateurs personnels intitulé Base « experte » de données sur les tsunamis dans le Pacifique (ETDB), qui permet d'accéder rapidement aux données relatives aux tsunamis historiques dans

Il existe des données historiques incomplètes concernant de nombreuses régions du Pacifique, mais elles sont difficilement accessibles et ne sont pas présentées sous une forme aisément utilisable pour l'évaluation des risques. Il faut continuer de collecter et de compiler des données historiques, en particulier sur les régions insuffisamment étudiées dans les catalogues actuels. Toutes les données historiques et tous les paramètres qui s'y rapportent doivent être rassemblés dans une base de données commune. Il est également nécessaire de mettre au point de meilleures méthodes d'accès à ces données et de visualisation, ce qui inclut la création de bases de données électroniques et d'interfaces graphiques avec l'utilisateur susceptibles d'être diffusées sur les médias électroniques ou accessibles par le biais du Web.

une large gamme de formats graphiques et de les visualiser. La Commission de l'UGGI sur les tsunamis est également en train de mettre au point un format universel de base de données sur les tsunamis afin que les États membres puissent soumettre leurs données historiques sous cette forme au CIIT ou WDC-A. La Commission sur les tsunamis étudie également la possibilité d'organiser plus efficacement les données historiques et autres données connexes relatives aux



Épicentres de séismes tsunamigènes historiques en Nouvelle-Guinée-région des îles Salomon. Cette figure a été créée au moyen du programme graphique « Base de données historiques sur les tsunamis pour la région du Pacifique de 47 av. J.-C. à 1999 après J.-C. » élaboré par le laboratoire sur les tsunamis de l'Académie russe des sciences.

tsunamis et de les mettre à disposition par le biais d'un centre virtuel de données accessible sur le Web et relié à d'autres organisations du monde entier qui collectent et conservent ces données.

Données sur les paléotsunamis

Dans quelques régions du Pacifique, ont commencé depuis peu des recherches sur les paléotsunamis, c'est-à-dire sur les phénomènes antérieurs aux archives historiques. Ce travail repose essentiellement sur la collecte et l'analyse des dépôts abandonnés par les tsunamis sur les zones côtières et sur d'autres éléments témoignant du relèvement ou de la subsidence liés à des séismes proches. Les recherches ont dans un cas éveillé de nouvelles craintes quant à l'éventualité de grands séismes et tsunamis le long de la côte nord-ouest de l'Amérique du Nord. Dans un autre, celui de la région de l'archipel des Kouriles et du Kamchatka, on a recherché beaucoup plus loin dans le passé des données concernant les tsunamis. Étant donné que le travail dans ce domaine se poursuit, peut-être apportera-t-il suffisamment d'informations nouvelles sur les phénomènes passés pour aider à évaluer le risque de tsunami.

Pour la plupart des côtes du Pacifique, il n'existe au mieux que des archives historiques de quelques tsunamis, et encore. La recherche sur les paléotsunamis offre la possibilité d'en apprendre davantage sur des phénomènes importants et très anciens. De telles connaissances pourraient être extrêmement précieuses pour aider à évaluer le risque de tsunami. Il est donc préconisé aux États membres de l'ITSU de soutenir les projets de recherche dans ce domaine.

Études consécutives aux tsunamis

Ces dernières années, après chaque grand tsunami destructeur, une étude de terrain a été organisée a posteriori afin de mesurer les limites du déferlement (runup) et de l'inondation et de recueillir auprès de témoins oculaires des données connexes en leur demandant par exemple le nombre de vagues, leur heure d'arrivée et laquelle d'entre elles était la plus grosse. Les études ont été essentiellement organisées au cas par cas, par des spécialistes des tsunamis, les participants venant souvent de plusieurs États membres de l'ITSU. L'ITSU a encouragé la création d'équipes internationales d'experts appartenant à tout un éventail de disciplines en rapport avec les tsunamis afin de mener des études sous les auspices de la COI, mais aucune n'a encore eu lieu. L'ITSU a publié

Les tsunamis sont des phénomènes relativement rares et la plupart des traces de leur passage sont éphémères. Il est donc indispensable d'organiser et de mener à bien des études de terrain rapidement et minutieusement après chaque tsunami afin de collecter des données détaillées précieuses pour l'évaluation du risque, la validation des modèles et autres aspects de l'atténuation des risques liés aux tsunamis. L'ITSU devrait continuer à soutenir la création, sous les auspices de la COI ou d'autres organisations, d'équipes internationales d'experts disposant des ressources techniques et financières nécessaires pour réaliser des études consécutives aux tsunamis. Les États membres sont engagés à contribuer au Fonds de dépôt de la COI pour les tsunamis afin d'apporter par avance le soutien nécessaire à de telles études, ainsi que d'aider à remplir les formalités et à mettre en place la logistique nécessaire à l'envoi rapide d'équipes sur le terrain. Le Guide pour les études de terrain consécutives aux tsunamis devrait être mis à jour en tant que de besoin, publié et largement distribué pour faciliter les études menées par la COI et/ou d'autres groupes.

un Guide pour les études de terrain consécutives aux tsunamis afin d'aider à préparer les études, de déterminer les mesures et observations qui devraient être faites et de normaliser les méthodes de collecte des données afin d'améliorer la cohérence et la précision des résultats.

Modélisation numérique

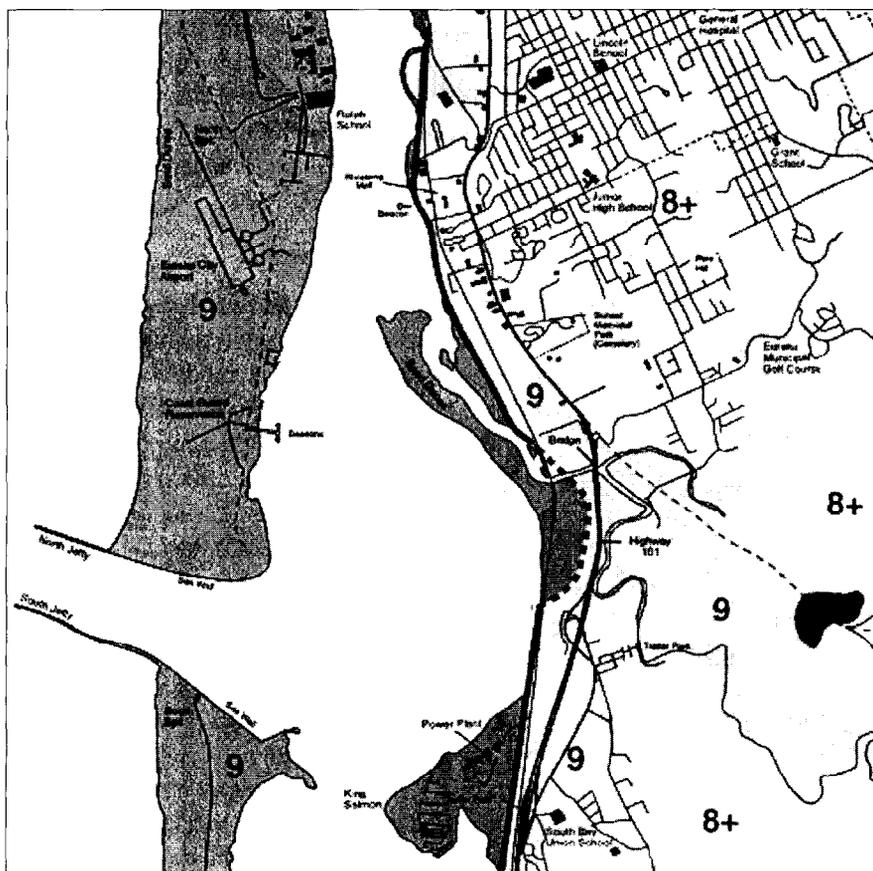
Le seul moyen de déterminer le déferlement et l'inondation potentiels d'un tsunami en champ proche ou lointain est souvent d'utiliser la modélisation numérique puisque les données sur les tsunamis antérieurs sont généralement insuffisantes. On peut initialiser des modèles en envisageant les pires scénarios potentiels en ce qui concerne les sources de tsunamis ou les ondes les plus proches du rivage afin de déterminer les pires scénarios correspondants pour le déferlement et l'inondation. Il est également possible d'initialiser des modèles à partir de sources plus petites, afin de comprendre la gravité du danger que représentent des phénomènes moins extrêmes mais plus fréquents. On se base alors sur ces informations pour établir des cartes et des schémas d'évacuation en cas de tsunami. Actuellement, seule une petite fraction de la zone côtière menacée a fait l'objet de ce travail de modélisation. Les techniques de modélisation suffisamment précises ne sont disponibles que depuis quelques années et ces modèles exigent une formation pour être compris et

utilisés correctement, ainsi que l'introduction de données bathymétriques et topographiques détaillées de la zone en cours de modélisation.

Pour résoudre ce problème, l'ITSU a appuyé un programme intitulé Projet d'échange sur la modélisation des inondations dues aux tsunamis (TIME), qui a assuré le transfert au Mexique, aux États-Unis d'Amérique, à la Corée, à la Turquie, au Canada, à la Grèce, à la Colombie, à l'Australie, à l'Indonésie, à l'Équateur, au Costa Rica et au Chili d'un modèle numérique d'inondation élaboré au Japon par M. Shuto. Plus important encore, le programme offre également une formation permettant d'apprendre à utiliser ce modèle. De nombreux pays de l'ITSU, parmi lesquels le Chili, le Mexique, la France et les États-Unis ont désormais mis au point des programmes destinés à modéliser systématiquement l'inondation potentielle de leurs zones côtières menacées en cas de tsunami.

On ne dispose, pour la plupart des côtes du Pacifique, que de très rares données historiques. Par conséquent, la modélisation numérique est peut-être le seul moyen d'estimer les risques potentiels que les tsunamis font courir à ces régions. Il existe désormais des techniques permettant d'effectuer ces évaluations. Les programmes informatiques et la formation nécessaires pour procéder à cette modélisation doivent être transférés, grâce à des programmes comme TIME, à tous les pays du Pacifique menacés. Il est préconisé aux États membres de mettre au point leurs propres programmes nationaux pour estimer les déferlements et inondations du tsunami sur leurs propres côtes par ces techniques.

Eureka, Californie



- Inondation due au tsunami
- Liquéfaction
- Glissement de terrain
- Inondation et liquéfaction dues au tsunami
- 8+, 9 Intensité sur l'échelle de Mercalli modifiée

Maisons arrachées de leurs fondations, effondrement partiel des immeubles en maçonnerie, meubles lourds et gros appareils renversés.

Zone côtière d'Eureka, Californie, montrant l'inondation potentielle calculée par modélisation numérique en cas de tsunami généré localement. La carte indique également les effets potentiels du séisme, y compris la liquéfaction et les glissements de terrain dont il conviendrait de tenir compte dans la conception des voies d'évacuation.

Alerte

Le deuxième impératif pour atténuer efficacement les effets des tsunamis est d'avoir un bon système d'alerte pour prévenir les communautés côtières d'un danger imminent. Les systèmes d'alerte se basent sur des données sismiques pour l'alerte initiale rapide, et sur des données relatives au niveau de la mer pour la confirmation et la surveillance du tsunami ou l'annulation de l'alerte. Les systèmes d'alerte sont également tributaires de toutes sortes de voies de transmission pour recevoir les données sismiques et celles relatives au niveau de la mer et pour envoyer des



Salle des opérations du Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique d'Ewa Beach, Hawaii.

messages aux autorités compétentes. Les centres d'alerte s'efforcent d'être : (1) rapides, en donnant l'alerte dès que possible lorsqu'un tsunami risque de se produire, (2) précis — en donnant l'alerte pour tous les tsunamis destructeurs tout en minimisant les fausses alertes, et (3) fiables — en veillant à fonctionner en continu et en s'assurant que leurs messages sont envoyés et reçus rapidement et compris par les utilisateurs du système.

Systèmes et centres d'alerte

On peut classer les systèmes d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique en fonction de deux facteurs interdépendants : (1) le type de tsunami contre lesquels ils sont prêts à donner l'alerte — de local à lointain, et (2) la zone de responsabilité qu'ils alertent pour

chaque type de tsunami — infranationale, nationale, régionale et internationale. Le Système pour l'ensemble du Pacifique — géré par le PTWC lance un appel international environ une demi-heure à une heure après la survenue d'un séisme et est donc utile aux communautés situées à plusieurs centaines de kilomètres au moins de la région source. Les systèmes régionaux, comme ceux gérés par les États-Unis d'Amérique, le Japon, la Fédération de Russie, la France et le Chili lancent essentiellement des alertes nationales dans les 10 à 15 minutes qui sui-

vent le séisme et sont utiles aux communautés situées à 100 kilomètres au moins de la région source. Les systèmes locaux gérés par le Japon et le Chili sont capables de lancer une alerte environ 5 minutes après le séisme, et parfois moins, afin d'assurer une certaine protection aux communautés situées dans un rayon de 100 kilomètres de la source. Il est tout aussi important d'annuler rapidement les alertes que d'en lancer lorsqu'on s'aperçoit qu'il n'arrive pas de grosses vagues et d'émettre des messages d'information concernant les grands séismes qui ne risquent pas de provoquer des tsunamis. Les centres ci-après gèrent des systèmes d'alerte aux tsunamis : le Centre d'alerte aux tsunamis d'Ewa Beach,

Hawaii, États-Unis d'Amérique ; le Centre d'alerte aux tsunamis de la côte Ouest et de l'Alaska à Palmer, Alaska, États-Unis d'Amérique ; les centres d'alerte aux tsunamis de la Fédération de Russie à Petropavlovsk-Kamchatka, dans l'archipel des Kouriles et à Sakhalinsk ; les centres d'alerte aux tsunamis japonais de Sapporo, Sendai, Tokyo, Osaka, Fukuoka et Nahar ; le Centre d'alerte aux tsunamis de Polynésie française, à Papeete, Tahiti, et le Système national d'alerte aux tsunamis du Chili dont le siège est à Valparaiso.

Certains autres membres ont aussi créé ou amélioré récemment les instruments dont ils disposent pour mesurer les séismes et/ou le niveau de la mer, ainsi que leur capacité d'analyse, ce qui servira de base aux systèmes nationaux d'alerte aux tsunamis.

Le Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique

En 1948, a été mis en service à l'Observatoire sismologique d'Ewa Beach près d'Honolulu, le Système d'alerte aux vagues d'origine sismique (Seismic Sea-Wave Warning System) afin d'alerter les communautés côtières américaines du Pacifique de l'arrivée imminente de tsunamis analogues à celui venu des îles Aléoutiennes qui avait frappé deux ans plus tôt Hawaii par surprise avec des conséquences catastrophiques.

En 1966, la Commission océanographique intergouvernementale a accepté l'offre des États-Unis d'Amérique de renforcer ces installations en créant à titre permanent le Centre international d'information sur les tsunamis. Peu de temps après, l'Observatoire prenait le nom de Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (PTWC) et devenait le centre opérationnel du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique. Sa principale responsabilité à cet égard était et reste, en cas de séisme tsunamigène, d'envoyer en temps voulu (généralement dans les 30 minutes qui suivent le séisme) des alertes à tous les participants internationaux ayant désigné une organisation chargée de recevoir le message et compétente en matière de gestion des situations d'urgence. En 1970, le PTWC est devenu le centre d'alerte aux tsunamis locaux de l'État d'Hawaii. Il lui incombe de lancer des alertes dans les 15 minutes qui suivent n'importe quel séisme intervenant à proximité des rivages d'Hawaii, ou au large, et d'une magnitude égale ou supérieure à 6.8. Les tsunamis destructeurs générés localement par des séismes liés à ses volcans actifs font partie intégrante de l'histoire d'Hawaii.

Le PTWC, géré par le Service météorologique national de la National Oceanic and Atmospheric Administration des États-Unis, assume donc trois responsabilités distinctes : (1) c'est le Centre international d'alerte aux tsunamis lointains pour la majeure partie du Pacifique ; (2) c'est, pour les États-Unis, le

Centre national chargé d'alerter toutes les parties intéressées situées dans la zone Pacifique des États-Unis en cas de tsunamis lointains, à l'exception des États de l'Alaska, de Washington, de l'Oregon et de la Californie ; (3) c'est le Centre régional d'Hawaii chargé d'alerter rapidement les autorités d'Hawaii de l'arrivée de tsunamis locaux. Des installations informatiques et de communication, ainsi que des géophysiciens assument ces tâches 24 heures sur 24. Le Centre utilise son propre réseau de capteurs sismiques de télé mesure, et des instruments de mesure du niveau de la mer situés à Hawaii et en d'autres points du Pacifique, ainsi que toute une gamme d'autres données sismiques relatives au niveau de la mer largement diffusées par le Centre d'alerte aux tsunamis de la côte Ouest et de l'Alaska, par d'autres organismes nationaux et par le biais du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique.

Le guide de l'utilisateur pour les activités du PTWC est la douzième édition du Plan de communication pour le Système d'alerte aux tsunamis (Communication Plan for the Tsunami Warning System, Twelfth Edition), publiée en juillet 1996 et mise à jour selon les besoins. Ce Plan donne des informations de base sur les tsunamis, des informations générales sur le Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique, définitions indispensables, informations sur le niveau de la mer et les stations sismiques, besoins en matière de communication et méthodes de communication applicables à chaque pays et types, critères et formats des messages.

Centre d'alerte aux tsunamis de la côte Ouest et de l'Alaska

Ce système d'alerte est opérationnel depuis 1968. Précédemment connu sous le nom de Centre d'alerte aux tsunamis en Alaska, il a récemment pris le nom de Centre d'alerte aux tsunamis de la côte Ouest et de l'Alaska (WC/ATWC) afin de mieux préciser sa zone de responsabilité, qui comprend les États de



Le Centre d'alerte aux tsunamis de la côte Ouest et de l'Alaska situé à Palmer, Alaska.

Washington, de l'Orégon et de la Californie, ainsi que la côte Pacifique du Canada. Il est lui aussi géré par le Service météorologique national de la NOAA. Il lance des alertes dans les 15 minutes qui suivent l'heure initiale d'un séisme pour les tsunamis générés au large des côtes de l'Alaska ou de la côte Ouest de l'Amérique du Nord, jusqu'à la frontière entre la Californie et le Mexique. Il prévient également sa zone de responsabilité, en coordination avec le PTWC, en cas de tsunamis atteignant l'ensemble du Pacifique. Il utilise son propre réseau de capteurs sismiques de télémesure et des instruments de mesure du niveau de la mer situés en Alaska, ainsi que d'autres données sismiques et relatives au niveau de la mer largement diffusées par le PTWC et d'autres organismes nationaux par le biais du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique.

Les centres japonais d'alerte aux tsunamis

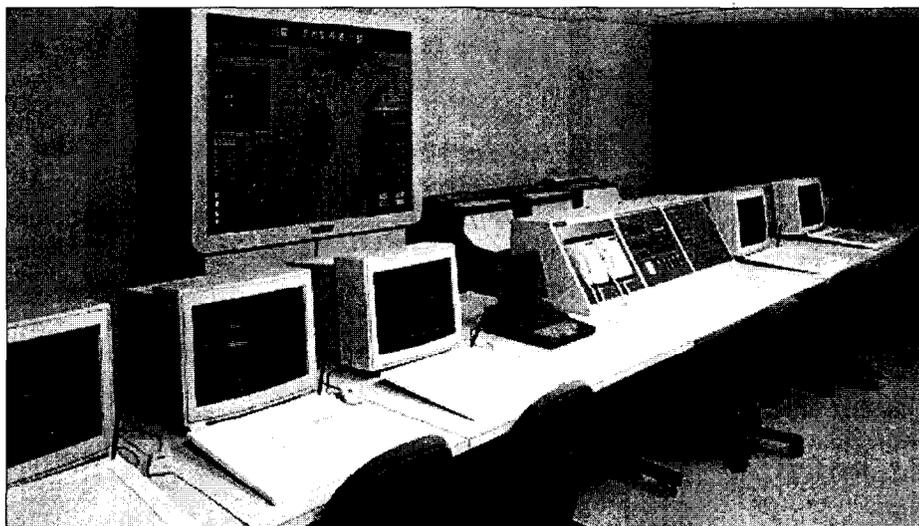
Le Service d'alerte aux tsunamis du Japon a été créé en 1952 et relève administrativement de l'Office météorologique japonais (JMA). Il existe actuellement dans le pays six centres régionaux chargés des services d'alerte aux tsunamis situés à Sapporo, Sendai, Tokyo, Osaka, Fukuoka et Naha (Okinawa). Ils sont responsables de l'émission des alertes aux tsunamis dans chacune des zones de responsabilité (AOR).

Les signaux émis par toutes les stations sismiques et de mesure du niveau de la mer du Japon sont constamment surveillés par un système automatique très perfectionné appelé Système d'observation des séismes et des tsunamis (ETOS). Peu après la détection d'un séisme par ETOS, les heures d'arrivée des ondes P et leur amplitude maximale sont automatiquement mesurées et, si nécessaire, corrigées interactivement par un opérateur. Elles servent à calculer

la zone source du séisme et sa magnitude. Des alertes au tsunami ou des conseils peuvent être diffusés si besoin, en fonction des paramètres du séisme. De tels messages contiendront des informations sur le niveau du tsunami prévu (« attention tsunami » = tsunami de moindre importance, « tsunami prévu » = tsunami d'une hauteur maximale de 2 mètres, et « important tsunami prévu » = tsunami de plus de 3 mètres aux pires endroits), les zones qui risquent d'être touchées (la côte japonaise est divisée en 18 régions pour la prévision des tsunamis) et l'évaluation des heures d'arrivée. Les messages sont envoyés à des organismes chargés de réduire l'impact des catastrophes, à la radio et télédiffusion et autres.

Le JMA gère environ 180 stations sismiques et 80 stations d'observation du niveau de la mer. Pour la surveillance des tsunamis, outre les marégraphes à déclencheur, on installe dans les ports, au-dessus du niveau de la mer, des marégraphes dotés de détecteurs à ultrasons afin de surveiller les grands tsunamis et d'autres au-dessus du bord des quais afin de surveiller le déferlement. Les émetteurs qui doivent transmettre les données des marégraphes à pression et à ultrasons sont situés à une altitude plus élevée afin de ne pas risquer d'être inondés pendant le phénomène.

Après les destructions imputables au séisme et au tsunami intervenu en 1993 à Hokkaido-Nansei-Oki, le JMA a reconstruit son réseau sismique et adopté des méthodes permettant de déterminer la magnitude du séisme à partir des ondes sismiques P. Cette nouvelle méthode permet d'évaluer plus rapidement et plus précisément les paramètres du séisme aux fins de prévision d'un tsunami. L'objectif du JMA est de diffuser une alerte aux tsunamis dans les trois minutes qui suivent un séisme tsunamigène.

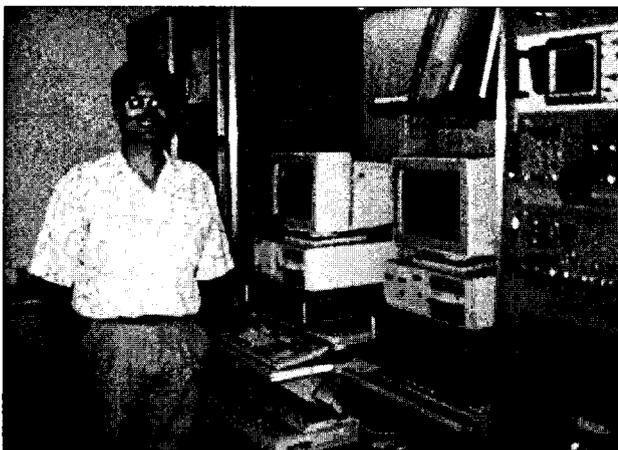


Portes de travail de l'un des six centres d'alerte aux tsunamis du Japon. Un système automatique d'observation des séismes et des tsunamis surveille constamment les signaux sismiques, détecte les tremblements de terre et traite les données les concernant.

De plus, pour diminuer le délai de transmission au public des alertes aux tsunamis par le biais des



Igor Kuz'minykh, correspondant national de l'ITSU pour la Fédération de Russie, examine une carte des temps de parcours des tsunamis affichée au mur derrière certains des appareils de communication du centre d'alerte aux tsunamis de Petropavlosk, Kamchatka.



Dominique Reymond, directeur par intérim du Centre polynésien de prévention des tsunamis debout à côté du système TREMORS et d'autres appareils de surveillance sismique au Centre de Papeete, Tahiti.

grands organes d'information, le JMA et les médias ont conjointement mis au point un système permettant de superposer simultanément le message d'alerte sur les écrans de télévision des particuliers à l'instant où il est émis par le JMA. Afin de réduire la durée de transmission, les alertes sont également communiquées aux municipalités via le système satellitaire de diffusion multidirectionnelle d'informations urgentes, qui fait appel au satellite météorologique géostationnaire (GMS), lequel sert de système d'appoint et de secours à tous les autres systèmes de communication par liaisons terrestres.

Centres d'alerte aux tsunamis de la Fédération de Russie

La Fédération de Russie (ex-URSS) a commencé à installer son système d'alerte aux tsunamis après le séisme qui s'était produit en 1952 au Kamchatka générant un tsunami dans toute la zone du Pacifique. Trois centres régionaux ayant accès à des données provenant de nombreuses stations sismiques et marégraphiques furent créés, à Petropavlosk, Kamchatka, dans l'archipel des Kouriles et à Sakhalinsk. Le service hydrométéorologique russe, aidé en cela par l'Académie russe des sciences et plusieurs autres institutions, assume la responsabilité générale de ces centres. Chacun d'entre eux est pleinement habilité à émettre une alerte aux tsunamis en cas de menace et les autorités locales compétentes sont prévenues lorsqu'il faut évacuer des zones habitées susceptibles d'être touchées par le tsunami. Des instruments spéciaux sont utilisés pour détecter des tremblements de terre d'une magnitude égale ou supérieure à 7 à des distances allant de 150 à 2 000 km au large, ainsi que les ondes de tsunamis qu'ils risquent de susciter. La méthode d'alerte fait appel à des cartes des temps de parcours des tsunamis et à des données historiques. Les communications avec le reste du Pacifique sont facilitées par une liaison Khabarovsk-Tokyo par câble.

Centre polynésien de prévention des tsunamis — CPPT

Le système installé en Polynésie française à la suite du tsunami venu de l'Alaska en 1964 fonctionne depuis 1965. Situé à Papeete, Tahiti, il utilise des informations obtenues par huit stations sismiques à courte période, trois stations sismiques à longue période et trois marégraphes gérés par le Réseau sismique polynésien. Les données de télémesure de cinq de ces stations sont transmises au Centre de Papeete, de même que celles d'une station sismique à large bande à trois composantes et d'une station marégra-

phique. Le système utilise également des informations provenant du Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique d'Ewa Beach, Hawaii. Le CPPT se sert d'un système de son invention, appelé TREMORS (Système d'évaluation en temps réel des risques de tsunamis par le moment sismique) pour détecter et localiser un séisme automatiquement, puis il calcule son moment sismique à partir de la magnitude de manteau (Mm), qui est fonction des ondes de longue période de Rayleigh et de Love. Le Centre diffuse des alertes aux tsunamis classées selon cinq niveaux de risque, qui reposent principalement sur le moment sismique du tremblement de terre.

Le système national d'alerte aux tsunamis du Chili

(Sistema Nacional de Alarma de Maremotos – SNAM)

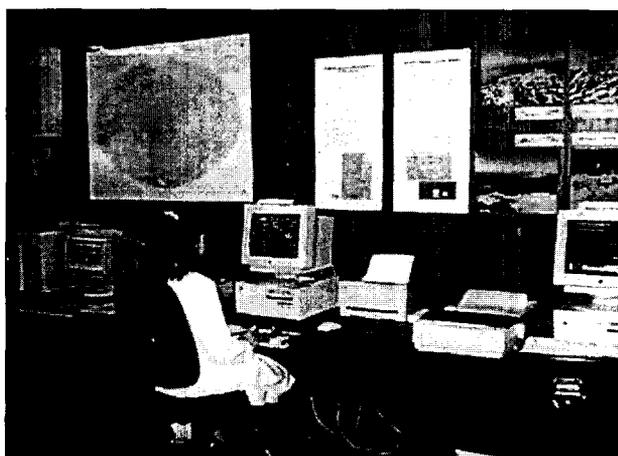
Le système chilien d'alerte aux tsunamis géré par le Service hydrographique et océanographique de la marine chilienne (SHOA) fonctionne depuis 1964 et a été mis en place à la suite du tsunami qui a frappé le pays cette année-là. Ce système, dont le siège est à Valparaiso, utilise les informations sismiques provenant de 31 stations de détection sismique à brève période que lui fournies le Réseau sismique national administré par le Département de géophysique de l'Université du Chili, les données d'un système TREMORS et de trois stations sismographiques à large bande à six composantes (trois accéléromètres fort mouvement et trois sismomètres). Le système fait également appel à 19 stations marégraphiques, sept envoyant leurs données en temps réel, tandis que les autres (bubblers) les accumulent et les envoient par paquets sur demande. Le SNAM diffuse des alertes aux tsunamis à toutes les communautés côtières par le biais des installations de communication de la marine et du réseau de radiodiffusion national du Bureau de secours d'urgence.

Autres systèmes nationaux d'alerte

Australie. L'Australie est en train de mettre en place un système d'alerte aux tsunamis pour sa côte située sur l'océan Indien ainsi que pour sa côte Pacifique. Le système sera géré par le Bureau de météorologie. Les données sismiques seront fournies par l'Organisation australienne d'études géologiques (AGSO – Geological Survey Organization) qui est en train d'élaborer un prototype de système d'alerte aux tsunamis et d'alerte aux séismes. La National Tidal Facility (NTF) fournira les moyens de surveillance et d'interprétation des données relatives au niveau de la mer.



Siège du système d'alerte aux tsunamis du Chili (SNAM) géré par le Service hydrographique et océanographique de la marine chilienne, et situé à Valparaiso.



Salle de commande du système national d'alerte aux tsunamis du Chili (SNAM).

Colombie. L'Observatorio Sismológico del Suroccidente (OSSO) de Colombie est en train de mettre en place un système d'alerte reposant sur des données numériques fournies à un système d'analyse TREMORS par des sismomètres à large bande. La diffusion des résultats aux organisations compétentes se fait par le biais d'INMARSAT. Les déferlements éventuels seront déterminés à l'aide de techniques de modélisation numérique acquises grâce au programme TIME.

Nicaragua. Le Nicaragua dispose de 20 sismomètres verticaux à brève période dont les données de télémessure en temps réel sont envoyées à l'Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales (INETER), ce qui constitue la base d'un système national d'alerte aux tsunamis. Les données émanant d'une station

sismique à large bande située à Boaco et un réseau d'accéléromètres fort mouvement peuvent également être accessibles par téléphone en temps quasi réel. Un réseau de sept stations marégraphiques numériques est également en cours d'installation sur les côtes du Pacifique et de l'Atlantique et sur le lac Managua, avec accès téléphonique aux données. L'INETER et la Défense civile sont en train de mettre au point des liaisons et procédures de communication pour la diffusion d'alerte aux tsunamis. Un système de sirènes visant à alerter le public est également prévu.

Pérou. Le système national d'alerte du Pérou, dont le centre se trouve à Callao, est géré par la Dirección de Hidrografía y Navegación del Perú (DHN) qui gère un réseau de 10 stations marégraphiques, les données émanant de la station de Callao étant transmises en temps réel au Centre. Le Pérou a

aussi fait récemment l'acquisition de deux systèmes TREMORS afin de renforcer ses capacités d'alerte. La Défense civile est notifiée grâce à une ligne téléphonique spécialement réservée à cet effet.

République de Corée. L'administration météorologique coréenne (KMA) utilise désormais un réseau en temps réel constitué de 12 sismomètres à brève période, de 8 sismomètres à large bande et d'un système TREMORS, ainsi que des informations provenant de certains autres centres d'alerte pour surveiller le risque de tsunami. On prévoit l'élargissement du réseau à 31 stations à brève période et large bande avec un système automatique d'analyse. En outre, un système de surveillance du niveau de la mer en temps réel sera installé sur une île au large de la côte Est. Le service météorologique public est chargé de diffuser les alertes.

L'actuel système de centres d'alerte a des lacunes. En effet, l'Asie du Sud-Est, le sud-ouest du Pacifique et l'Amérique centrale et du Sud n'ont pas de centres régionaux d'alerte aux tsunamis alors qu'il s'agit de zones extrêmement vulnérables. Elles jouxtent en effet certaines des zones sismiques les plus actives et les plus tsunamigènes et ont été frappées par 14 des 18 derniers tsunamis destructifs locaux (voir le tableau, p. 4). De plus, bien que le PTWC lance des alertes pour les tsunamis lointains qui traversent le bassin du Pacifique, il n'existe pas de centres correspondants pour avertir de l'arrivée des tsunamis traversant la majorité des mers bordières du Pacifique.

Des centres d'alerte régionaux devraient être créés en Asie du Sud-Est, dans le sud-ouest du Pacifique et en Amérique centrale et du Sud. Dans ces régions, des systèmes rudimentaires existent déjà en de nombreux endroits. De nouveaux centres peuvent être mis sur pied en utilisant les ressources existantes, ainsi que les technologies et méthodologies transférées par d'autres centres d'alerte. La formation du personnel opérationnel peut être assurée par l'ITSU par le biais du CIIT, ou organisée par les centres d'alerte existants. Tous les centres d'alerte nationaux sont invités à partager en temps voulu les informations décisives concernant les séismes, le niveau de la mer et les alertes avec les pays voisins dépourvus de systèmes d'alerte, qui sont menacés par un tsunami au même titre qu'eux parce qu'ils sont riverains d'une même masse d'eau.

En dehors de la région du Pacifique, il n'existe aucun centre d'alerte aux tsunamis bien que le risque de voir un tel phénomène se produire existe des deux côtés de l'océan Atlantique, dans l'est de l'océan Indien et en Méditerranée, dans les Caraïbes et en mer Noire. Il faudrait préconiser la création de centres dans ces régions et l'ITSU devrait tirer parti de ses réalisations et de ses nombreuses années d'expérience dans le Pacifique pour leur fournir des informations et des indications en la matière.

Les centres d'alerte doivent poursuivre leurs efforts afin de réduire le temps nécessaire à l'émission des alertes initiales, de fournir des évaluations aussi précises que possible et d'opérer de façon fiable dans tous les domaines.

Données

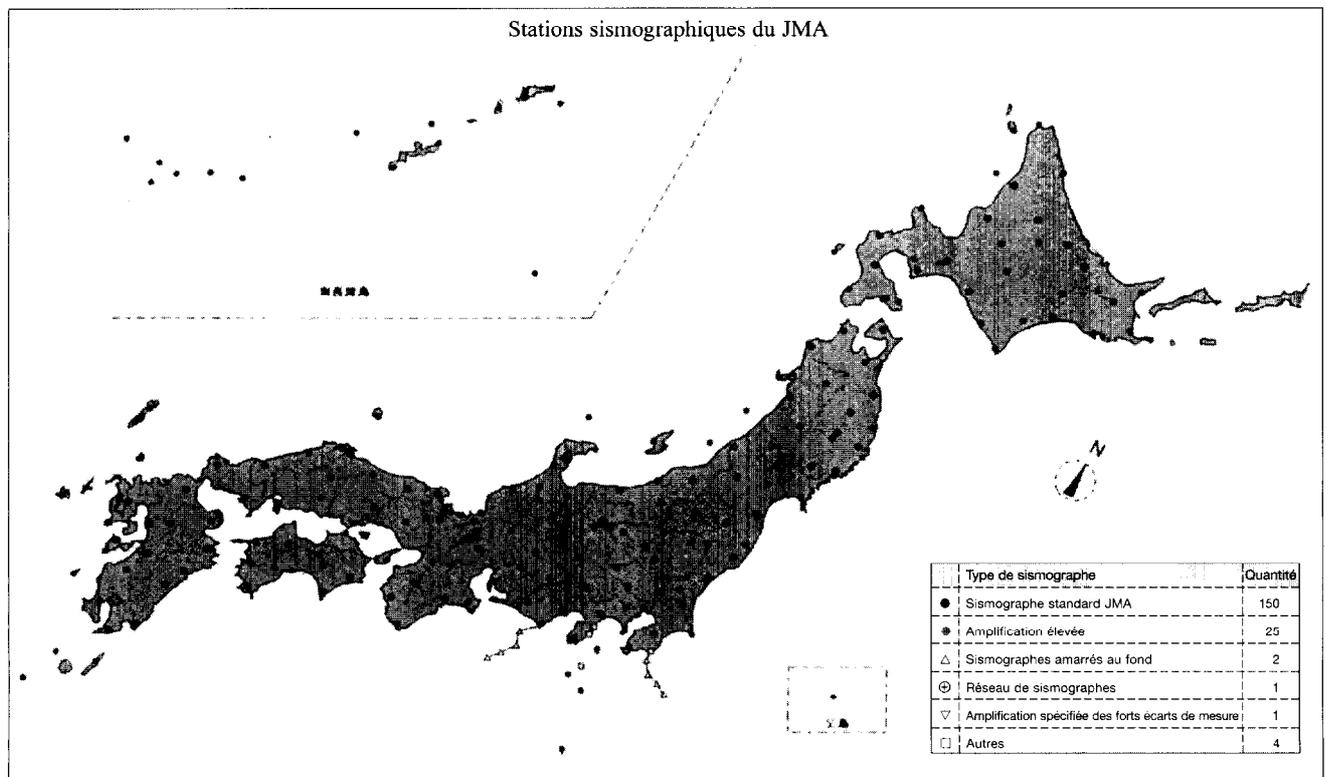
Les centres d'alerte utilisent des données sismiques et des données relatives au niveau de la mer en temps réel ou quasi réel ainsi que des données historiques concernant les tsunamis et les séismes afin de détecter et de localiser rapidement les séismes potentiellement tsunamigènes, de confirmer qu'un tsunami s'est formé et d'estimer son impact potentiel sur les côtes dans la région dont ils sont responsables.

Données sismiques

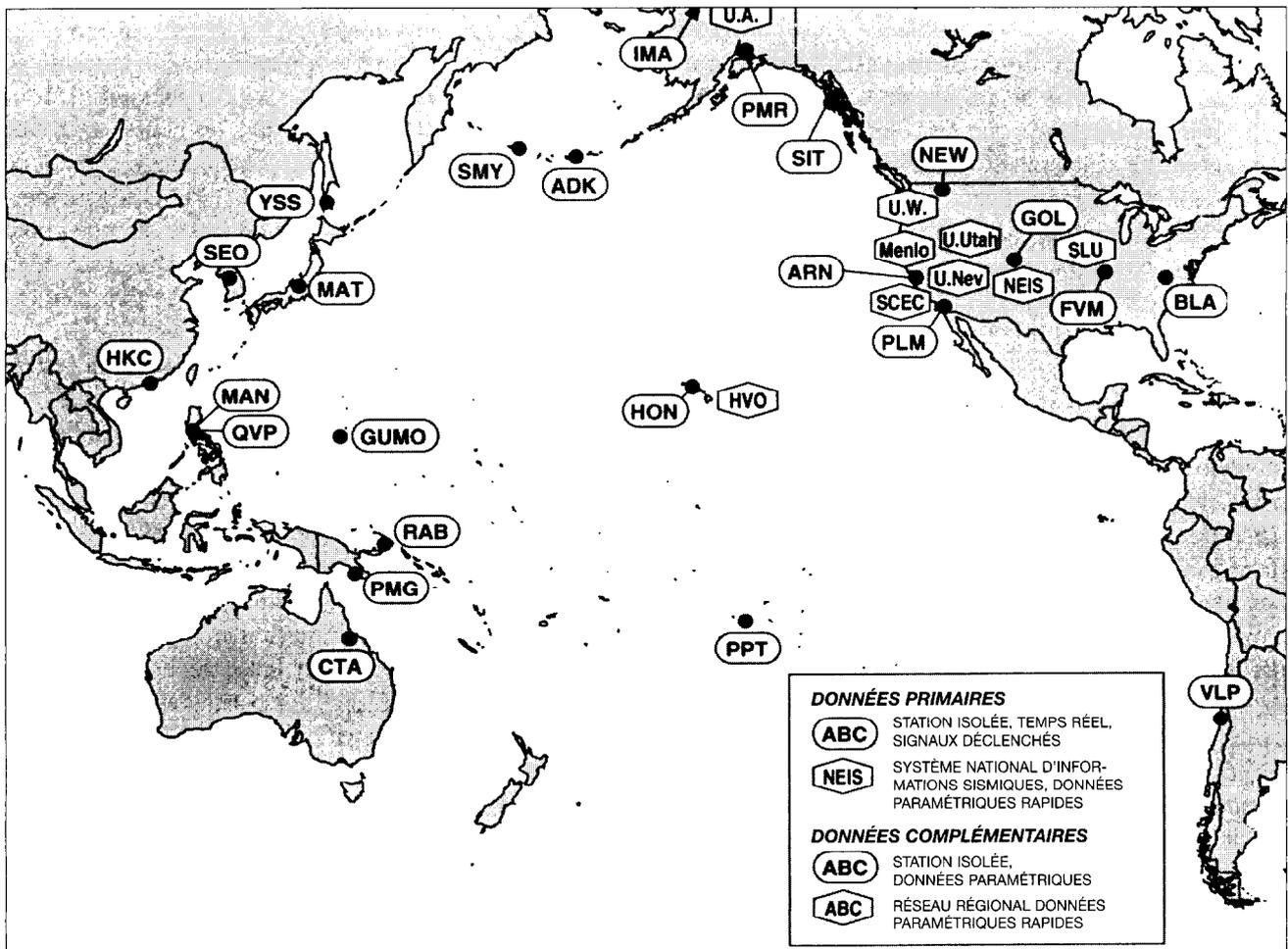
Les centres d'alerte se servent des signaux sismiques, vibrations émises par les séismes qui se propagent rapidement à travers la terre, pour détecter le phénomène, puis en déterminer le lieu et l'ampleur. Il est, à partir de ces informations, possible d'évaluer rapidement si un tsunami risque de se former et de lancer des alertes initiales ou des messages d'information appropriés. Les sismomètres standards à courtes périodes (0,5-2 sec/cycle) et à longues périodes (18 à 22 sec/cycle) fournissent des données permettant de situer le tremblement de terre et d'en mesurer l'ampleur. Les données fournies par les sismomètres récents à large bande (0,01-100 sec/cycle) peuvent servir à ces mêmes fins, ainsi qu'à calculer le moment sismique, qui permet de mieux mesurer l'ampleur des plus grands séismes lesquels sont aussi les plus

tsunamigènes. Les données sismiques sont envoyées aux centres en temps réel ou quasi réel sous forme de signaux continus, de signaux déclenchés ou de données paramétriques (par exemple, les heures d'arrivée des ondes P) en ayant recours à une large gamme de techniques de communication à courte et longue portée. Dans certains cas, les données sismiques sont intégralement traitées par un autre observatoire et seules la localisation et la magnitude du tremblement de terre sont communiquées.

Localiser un tremblement de terre nécessite des données provenant de nombreux capteurs sismiques implantés, dans l'idéal, tout autour du lieu où se produit le phénomène. Pour les séismes proches, on a souvent recours à un dense réseau de stations sismiques pour localiser rapidement et exactement le phénomène. Des mesures de localisation moins précises, mais néanmoins suffisantes, peuvent également être obtenues à partir d'une seule station sismique à trois composantes, si l'on emploie des techniques d'analyse du mouvement des particules comme dans l'algorithme de TREMORS (Système d'évaluation en temps réel des risques de tsunamis par le moment sismique). TREMORS est également capable d'évaluer automatiquement le moment sismique toutes les 50 secondes après le départ de l'onde P, à partir des données des sismomètres à large bande, ce qui en fait



Au Japon, le système d'alerte aux tsunamis repose sur le Réseau d'observation sismique de l'Office météorologique japonais, qui compte environ 180 stations sismiques réparties plus ou moins uniformément dans tout le pays.



Sources de données primaires et complémentaires qui apportent leur contribution au Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique. Ces sources changent parfois ; les informations les plus récentes se trouvent dans le Plan de communications du Système d'alerte aux tsunamis et ses mises à jour.

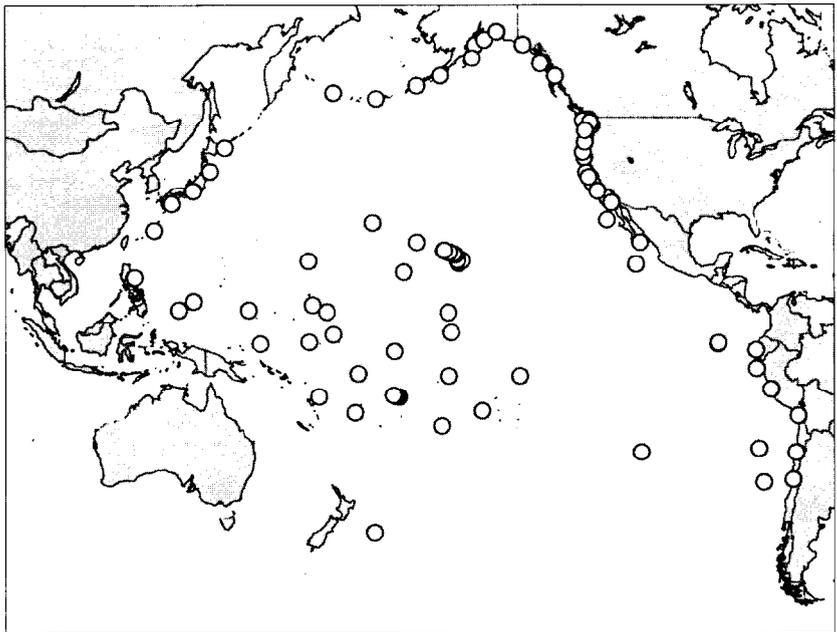
un instrument idéal d'analyse pour les systèmes d'alerte aux tsunamis locaux, régionaux et à l'échelle de l'ensemble du bassin océanique.

Le monde compte désormais des milliers de stations sismiques et beaucoup de celles utilisées par les centres d'alerte aux tsunamis peuvent appartenir à d'autres organisations et servir essentiellement à d'autres fins, comme par exemple les sismomètres destinés à la recherche, et/ou à la surveillance des

explosions nucléaires souterraines, des volcans, de l'intérieur de la terre et des risques sismiques. Compte tenu de leur coût d'installation et d'entretien, il est souvent attrayant pour toutes les parties concernées que ces instruments soient à usages multiples et cofinancés. Les centres d'alerte aux tsunamis peuvent toutefois avoir besoin de leurs propres capteurs sismiques pour assurer une meilleure couverture des zones sismiques et mieux maîtriser la situation.

La technologie des capteurs sismiques et les techniques de traitement des données sismiques sont relativement au point. Elles peuvent toutefois être coûteuses et/ou difficiles à appliquer étant donné la rapidité et la précision qu'exige l'évaluation des séismes dans un centre d'alerte aux tsunamis. Il faut mettre en place des stations sismiques et des techniques d'analyse mieux adaptées aux problèmes auxquels sont confrontés ces centres. Il est vivement préconisé aux États membres de continuer plus que jamais à fournir des données sismiques en temps réel ou en temps quasi réel au PTWC, ainsi qu'aux centres d'alerte aux tsunamis régionaux, existants et futurs.

Marégraphes utilisés par le Centre d'alerte au tsunami dans le Pacifique afin de confirmer l'arrivée des tsunamis qui balaient l'ensemble du Pacifique et de les évaluer. Ces marégraphes appartiennent à de nombreuses organisations qui les gèrent et s'en partagent les données à diverses fins. La configuration du réseau change de temps à autre, les informations les plus récentes se trouvent dans le « Plan de communications du Système d'alerte au tsunamis » et ses mises à jour.

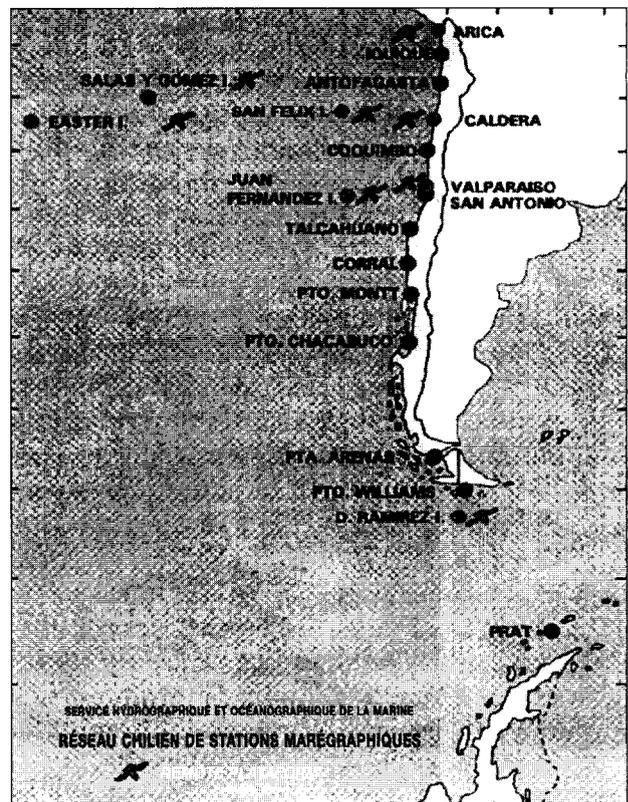


Données relatives au niveau de la mer

Les marégraphes constituent un élément essentiel des systèmes d'alerte aux tsunamis. Installés à des endroits stratégiques, ils servent à confirmer rapidement l'existence ou non d'ondes de tsunami à la suite d'un séisme, à surveiller l'avancée du tsunami, à contribuer à évaluer la gravité du risque et à fournir des données servant de base à l'annonce de fin d'alerte. Les marégraphes peuvent aussi constituer le seul moyen de détecter un tsunami lorsque l'on ne dispose pas de données sismiques ou lorsque le phénomène n'est pas dû à un tremblement de terre.

La majorité des marégraphes utilisés pour prévenir de l'arrivée d'un tsunami ont été conçus pour mesurer les marées. Ils disposent d'ordinaire d'un puits d'amortissage pour éliminer les signaux de fréquence plus élevée émis par les vagues dues au vent. Il s'agit en général d'un long cylindre vertical et creux, scellé au fond à l'exception d'une petite ouverture et installé sur le côté d'une jetée de façon à s'avancer dans l'océan. L'eau de mer présente dans le cylindre monte et descend lentement à mesure que les marées changent, mais la petite ouverture pratiquée au fond limite le flux si bien que les vagues dues au vent et la houle, qui ont une fréquence beaucoup plus élevée, ont peu d'effet sur le niveau. Les ondes de tsunami ont des fréquences situées entre les deux extrêmes et peuvent passer à l'intérieur du puits, mais souvent avec un certain retard et une amplitude réduite. Les mesures du niveau de la mer à l'intérieur du puits sont généralement réalisées par des techniques mécaniques ou acoustiques.

Un autre type de marégraphe connu sous le nom de marégraphe à bulles (bubbler) réagit à un plus large éventail de fréquences. Il utilise un flux lent mais constant de gaz qui s'échappe de l'extrémité submergée d'un tube long et étroit. Lorsque le niveau de l'océan monte et descend au-dessus de l'ouverture du



Position des marégraphes du Système national chilien d'alerte aux tsunamis.

tube, la pression nécessaire pour maintenir ce flux de gaz constant augmente et diminue proportionnellement. Cette contre-pression peut être mesurée et convertie en une mesure du niveau de la mer.

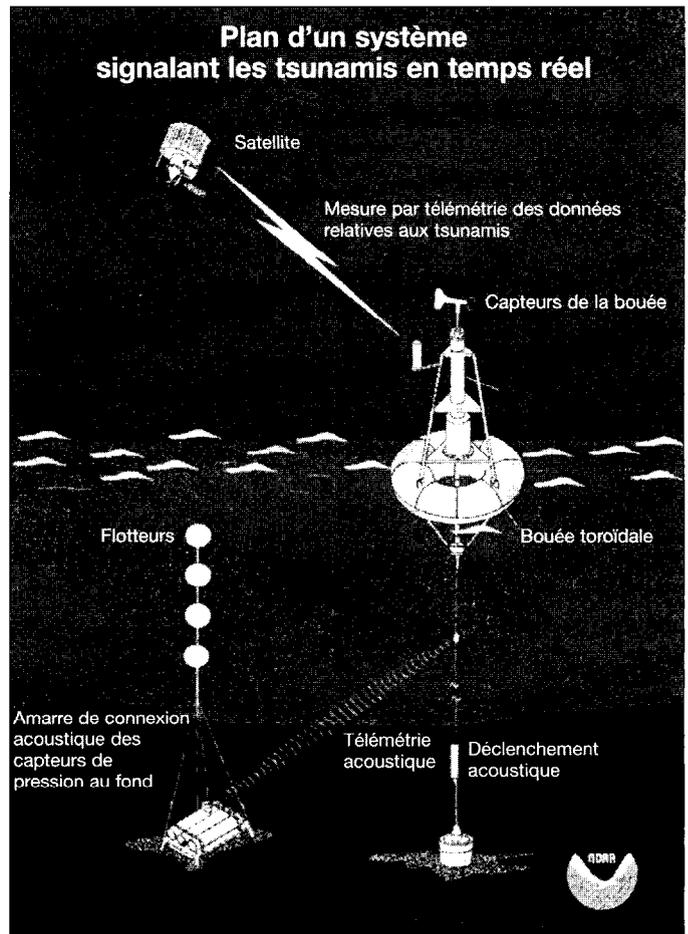
On a, ces dernières années, mis au point et utilisé un nouveau type de marégraphes spécialement conçu pour les tsunamis, doté d'un transducteur piézoélectrique, qui convertit la pression de l'eau, directement proportionnelle à son niveau, en voltage. Il peut être mouillé au large au fond de l'océan et être connecté à une station terrestre par un câble à signal électrique, ou bien être déployé dans les profondeurs de l'océan et transmettre ses signaux à une bouée flottant en surface. Pour l'étude des tsunamis, l'un des avantages de ce type de capteurs est de pouvoir mesurer un plus large éventail de niveaux d'eau et, par conséquent, même les plus hauts tsunamis, et de répondre à un large spectre de fréquences si bien qu'il peut enregistrer le signal du tsunami sans distorsion. Il est en outre possible d'installer ces capteurs de manière plus stratégique, au milieu de l'océan, là où il n'existe aucune île pour abriter d'autres types d'appareils et où le tsunami ne subit pas de distorsion imputable aux effets de la faible profondeur de l'eau et à la configuration du littoral.

Aux États-Unis d'Amérique, un capteur destiné à mesurer à terre la présence inhabituelle d'eau apportée par un tsunami ou tout autre sorte d'inondation, ainsi que sa hauteur, est en cours de mise au point. Parce qu'il est exclusivement installé à terre, cet indicateur de montée des eaux (runup gauge) devrait être moins coûteux à construire, à installer et à entretenir.

Le Japon surveille régulièrement le niveau de la mer grâce à des capteurs à ultrasons disposés au-dessus de la surface de la mer, à des capteurs de pression de l'eau situés à terre pour mesurer la montée des eaux et à des marégraphes à déclencheur. Le Port and Harbour Research Institute a également mis au point des capteurs mouillés au large afin de mesurer les tsunamis à une distance d'environ 50 km de l'entrée de la baie de Tokyo.

Les données fournies par ces différents types de capteurs sont transmises sous forme analogique ou numérique aux centres d'alerte ou à d'autres organisations et/ou enregistrées localement sur papier millimétré, sur bande perforée, sur des supports informatiques magnétiques ou dans une mémoire d'ordinateur.

Pour être utiles aux fins d'alerte, les marégraphes doivent être situés à proximité de la région source du tsunami afin que l'on puisse savoir le plus rapidement possible si le séisme a effectivement



Système récemment mis au point par les États-Unis d'Amérique pour enregistrer les tsunamis au large au moyen d'un capteur de pression au fond retransmettant le signal aux centres d'alerte par l'intermédiaire d'une bouée et d'un satellite.

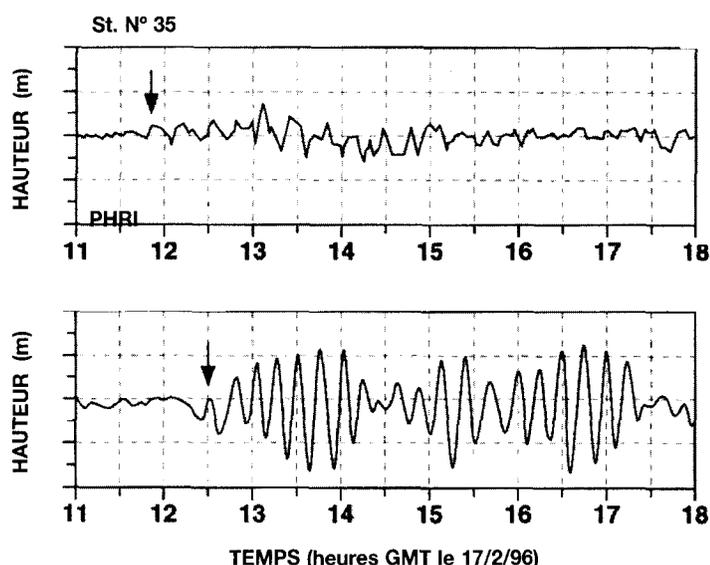
provoqué un tsunami ou non, et pour avoir une évaluation initiale de son ampleur. Ils devraient également y en avoir entre la source et les zones côtières menacées afin de suivre l'avancée du tsunami et de contribuer à prévoir son impact. Pour les tsunamis locaux, il faut implanter de très nombreux marégraphes le long des côtes menacées afin d'obtenir le plus rapidement possible la confirmation et l'évaluation des ondes du tsunami. Bien que la couverture de certaines côtes du Pacifique menacées par des tsunamis locaux soit dense, par exemple au Japon, aux États-Unis d'Amérique et au Chili, d'autres côtes menacées localement ne disposent que de quelques appareils, voire aucun. Pour les tsunamis à l'échelle de l'ensemble du Pacifique, la couverture peut être moins dense mais doit néanmoins être très complète dans les régions source et dans l'ensemble du bassin. Il existe des marégraphes à proximité de toutes les régions connues pour générer d'importants tsunamis, à l'exception des zones sismiques situées au large des îles Kouriles et de la péninsule du Kamchatka. La Fédération de

Russie est, dans le cadre d'un projet conjoint entrepris avec la COI et les États-Unis d'Amérique, en train de réinstaller dans cette région des marégraphes qui transmettront des données aux centres d'alerte aux tsunamis russes ainsi qu'au PTWC. Il subsiste toutefois de nombreuses et graves lacunes dans la couverture de l'intérieur du bassin du Pacifique et en particulier du Pacifique Nord, où seules quelques îles sont susceptibles d'abriter des marégraphes. Pour obtenir une meilleure couverture de l'intérieur du bassin du Pacifique, il faudra avoir recours à des appareils comme les marégraphes de grande profondeur qui

n'ont pas besoin de se trouver à proximité du rivage.

De même que les capteurs sismiques, les marégraphes utilisés pour détecter les tsunamis appartiennent parfois à d'autres organisations qui en assurent l'entretien et ils peuvent au départ avoir été essentiellement conçus à d'autres fins. Outre la mesure des marées, ils peuvent servir à des recherches concernant les changements à long terme du niveau de la mer imputables au réchauffement mondial et aux variations climatiques et des modifications à plus court terme dues à des phénomènes plus transitoires, comme El Niño et les ondes de tempête. Les centres

TSUNAMI D'IRIAN JAYA DU 17/2/96



Signaux de tsunami mesurés par un capteur sous-marin situé à 50 km de l'embouchure de la baie de Tokyo à une profondeur de 50 m environ (graphique supérieur) et par un autre capteur situé sur le rivage (graphique inférieur). Le tsunami est détecté par le capteur situé en dehors de la baie environ 40 minutes avant qu'il n'atteigne le rivage (flèches). Ce capteur installé au large a été conçu par le Port and Harbour Research Institute du Japon.

De nombreuses régions du Pacifique menacées par des tsunamis locaux n'ont pas de marégraphes à proximité pour détecter rapidement ou confirmer la présence d'un tsunami ou pour en évaluer le caractère. Il faut y installer des marégraphes et en transmettre les données en temps réel aux centres régionaux d'alerte aux tsunamis et/ou à d'autres services compétents. Des instruments plus simples et moins coûteux tels que l'indicateur de montée des eaux déjà évoqué plus haut doivent également être mis en place et utilisés à cette fin.

La couverture assurée par le réseau de marégraphes utilisés pour détecter et évaluer les tsunamis qui risquent de frapper l'ensemble du Pacifique comporte également d'importantes lacunes. Il faudrait réinstaller des marégraphes dans la région source des îles Kouriles-Kamchatka, ainsi que dans toutes les autres régions qui ne sont pas couvertes. Des instruments comme les marégraphes grande profondeur, en cours de mise au point par les États-Unis d'Amérique, devraient être déployés dans les zones intérieures du bassin du Pacifique qu'il est impossible d'équiper autrement. Les nouveaux instruments et techniques tels que les marégraphes de grande profondeur qui mesurent plus précisément les ondes de tsunamis au moment où elles se forment et au fur et à mesure qu'elles se propagent à travers le bassin du Pacifique sont nécessaires au PTWC pour mieux prévoir l'impact du tsunami sur les côtes.

Il est préconisé aux États membres et à leurs organismes compétents de continuer d'apporter au PTWC, ainsi qu'aux centres d'alerte aux tsunamis régionaux existants et futurs de nouvelles données en temps réel ou en temps quasi réel sur le niveau de la mer. Après tout grand séisme côtier, les autorités locales et les observateurs qui relèvent les mesures des marégraphes devraient contacter immédiatement leur centre national d'alerte afin de lui fournir un résumé de leurs observations. Il incombe alors aux centres nationaux d'informer immédiatement le PTWC.

Il est en outre préconisé d'avoir recours à des équipements polyvalents se partageant capteurs, appareils électroniques de traitement des données, méthodes de communication, et surtout mécanismes de soutien, et également susceptibles de servir à mesurer des tsunamis.

d'alerte aux tsunamis peuvent cependant avoir eux aussi besoin de leurs propres appareils pour effectuer des relevés dans des endroits stratégiques où l'on ne dispose pas d'autres données et pour obtenir dans de meilleurs délais des signaux qualitativement mieux adaptés à la mesure des tsunamis aux fins d'alerte.

Données historiques sur les tsunamis et les séismes

Les centres d'alerte ont besoin d'avoir rapidement accès aux données historiques relatives aux tsunamis et aux séismes qui les aideront à évaluer si un séisme ayant frappé une région donnée est susceptible d'avoir provoqué un tsunami, et si ce tsunami risque d'avoir un impact sur les régions côtières relevant de leur zone de responsabilité. Il est par exemple utile de savoir qu'une zone de subduction donnée a connu de nombreux séismes historiques d'une magnitude supérieure à 8, mais qu'aucun n'a jamais provoqué de tsunami important. Il est également utile de savoir quels relevés historiques d'anciens tsunamis destructeurs et non destructeurs provenant d'une région source donnée ont été faits par un marégraphe particulier. Ces données, si elles existent, se présentent généralement sous forme de rapports, de catalogues, de cartes et de quelques bases de données électroniques, mais ce ne sont pas les formats les plus faciles et rapides à utiliser pour les centres d'alerte. Des projets comme la base « experte » de données sur les tsunamis, qui a le soutien de l'ITSU, peuvent contribuer à rendre ces

L'organisation et le mode d'accès aux données historiques relatives aux séismes et aux tsunamis ne permettent pas aux centres d'alerte d'en tirer utilement parti. Des projets comme la base experte de données sur les tsunamis, qui contribuent à rendre les données historiques sur les tsunamis et les séismes correspondants plus rapidement accessibles aux centres d'alerte et autres organismes dans toute une gamme de formats graphiques utiles, sont encouragés.

Les données fournies par les marégraphes ne sont ni systématiquement sauvegardées, ni mises à disposition à la suite de chaque tsunami qui se produit dans le Pacifique, surtout, et ce sont les plus nombreux, lorsqu'ils ne sont pas destructeurs. Or ces données sont très importantes pour aider les centres d'alerte à interpréter les signaux relatifs au niveau de la mer lors de futurs tsunamis, ainsi qu'à des fins de recherche. Il faut mettre sur pied un plan efficace visant à garantir la collecte de ces données à la suite de chaque phénomène, leur présentation selon un format numérique commun, et les mettre à disposition par le biais de l'Internet ou d'autres moyens électroniques de communication.

données plus accessibles et plus utiles aux centres d'alerte ainsi qu'aux scientifiques et aux administrateurs chargés de gérer les situations d'urgence.

Données des modèles numériques

Les centres d'alerte commencent à utiliser des données provenant de modèles numériques pour avoir des indications leur permettant de prévoir la gravité d'un tsunami dans leur zone de responsabilité à partir des paramètres du séisme et des relevés des marégraphes.

Par exemple, pour faire face à la menace nationale que les tsunamis font peser sur le pays, le Japon est en train d'établir des modèles de déferlement de tsunamis provoqués par des séismes hypothétiques de magnitudes et de profondeurs différentes localisés sur plus de 1 000 points de grille situés au large, mais en champ proche, ce qui permettra d'établir une base de données de la hauteur prévue des tsunamis le long de chaque zone de la côte pour n'importe quel séisme local. Cette base de données servira à la fois aux alertes et à des fins de planification. En cas de véritables tsunamis, les hauteurs et les temps d'arrivée prévus seront extraits de la base de données immédiatement après la détermination de l'hypocentre et de la magnitude du séisme, et une alerte au tsunami contenant ces résultats sera diffusée. Le JMA prévoit de mettre en œuvre cette nouvelle méthode de prévision à partir du printemps 1999.

Le Centre d'alerte aux tsunamis de la côte Ouest et de l'Alaska a également mis au point une méthode de prévision de la hauteur des vagues reposant sur la modélisation numérique. Elle dépend en temps réel des paramètres du séisme et des relevés d'au moins deux marégraphes.

La plupart des centres d'alerte commencent seulement à utiliser systématiquement les données de modèles numériques pour prévoir plus facilement les côtes susceptibles d'être touchées par une source donnée et la hauteur possible des vagues ou le déferlement. Comme les techniques de modélisation sont désormais plus rapides et plus précises, les centres d'alerte devraient s'efforcer de créer et d'utiliser des données de synthèse pour contribuer à réduire le nombre d'alertes inutiles et pour indiquer les répercussions prévues attendues dans leur zone de responsabilité.

Autres données

Les centres d'alerte aux tsunamis peuvent, à l'occasion, avoir besoin de certains autres types de données, par exemple en cas d'éruption volcanique ou de

glissement de terrain imminent à proximité d'une masse d'eau. On traite généralement ce type de phénomène au cas par cas, le centre d'alerte travaillant souvent en collaboration étroite avec un autre organisme plus directement responsable du phénomène principal.

Communications

Les systèmes d'alerte aux tsunamis ont des besoins énormes et très particuliers en matière de communications. Il faut envoyer les signaux relatifs aux séismes et au niveau de la mer depuis des endroits reculés, souvent dépourvus d'électricité ou de lignes téléphoniques, et les messages d'alerte doivent être transmis rapidement et de façon fiable à des abonnés disposant de différents moyens d'accès. Les distances à couvrir vont de moins d'un kilomètre à des dizaines de milliers de kilomètres. Répondre à ces besoins exige toutes sortes de méthodes de communication.

Les antennes de réception des signaux émis par des satellites géostationnaires (à gauche, partiellement cachées derrière l'arbre) et les antennes de radio à très haute fréquence (à droite, au sommet de la tour) font partie des nombreux moyens de communication du PTWC.



Matériel pédagogique relatif aux tsunamis et au TWSP produit et publié par les États membres du CIG/ITSU et la COI.

Accès aux données en temps réel

Pour être utiles, les données sismiques et celles relatives au niveau de la mer, utilisées par les centres d'alerte doivent être reçues de manière fiable en temps réel ou presque réel. De nombreuses techniques de communications sont utilisées à cette fin, parmi lesquelles la radio à très haute fréquence, les liaisons hertziennes, les lignes terrestres dédiées, les téléphones à cadran, les liaisons continues par satellite, les transmissions par satellite programmées, et les réseaux de transmission par paquets. Certains sites de collecte de données ne sont accessibles qu'en

combinant plusieurs techniques. On peut avoir recours à un circuit de communications commercial, mais il faut souvent du matériel spécialisé pour convertir les données de façon qu'elles soient transmissibles sur le circuit. Pour compliquer encore le problème de communications, les données sont collectées dans des lieux reculés, dépourvus d'électricité ou d'accès aux lignes téléphoniques. Lors d'un tsunami local, il arrive parfois aussi que les lignes électriques et téléphoniques soient détruites par le séisme. Pour les marégraphes qui fournissent des données à un rythme très lent, la solution a consisté à installer des plates-formes de collecte des données fonctionnant à l'électricité solaire pour transmettre régulièrement les données par l'intermédiaire du Satellite d'exploitation géostationnaire pour l'étude de l'environnement (GOES) des États-Unis ou du Satellite météorologique géostationnaire (GMS). Des stations sismiques intelligentes qui détectent les grands séismes et qui, contrairement aux stations sismiques standard qui doivent transmettre les données en continu, n'ont besoin que de transmettre quelques bytes de données paramétriques sont également en cours de mise au point.

Les centres de données ont besoin de recevoir, de façon fiable et en temps réel ou à très peu de chose près réel, des données indispensables sur les séismes et le niveau de la mer. Les méthodes actuelles et les voies de transmission des données fournies aux centres d'alerte par les instruments de mesure du séisme et du niveau de la mer sont souvent complexes et coûteuses, et leurs contraintes d'utilisation empêchent parfois le déploiement des capteurs nécessaires, en particulier dans les régions reculées. Les satellites, les réseaux à fibres optiques et les technologies du téléphone cellulaire permettent d'utiliser de nombreuses méthodes nouvelles de communication. Il convient d'évaluer constamment ces dernières pour voir si elles sont susceptibles de résoudre les problèmes de communication des données auxquels le TWSP est confronté, et de les adopter s'il y a lieu. Il faudrait en outre mettre au point et installer des instruments moins exigeants en matière de communication.

Diffusion des messages

Les méthodes de communications grâce auxquelles un centre transmet rapidement ses messages d'alerte et d'information aux utilisateurs sont tout aussi importantes que les voies de communication permettant l'accès aux données en temps réel. De courts messages peuvent être transmis en toute sécurité aux bureaux du monde entier par le biais de circuits

dédiés tels que le Système mondial de télécommunications (SMT) ou le Réseau du service fixe des télécommunications aéronautiques (RSFTA). Des messages peuvent également être transmis dans le monde entier par le biais de circuits commerciaux comme le télex. Le courrier électronique constitue un autre moyen de joindre rapidement des personnes et des bureaux du monde entier, mais cette méthode est peut-être moins fiable car elle dépend de liaisons sur

lesquelles les centres n'ont aucun contrôle. Aux niveaux local ou national, les messages d'alerte aux tsunamis peuvent également être envoyés par écrit ou oralement via des circuits conçus pour la défense nationale ou d'autres services d'urgence. Enfin, il est également possible d'envoyer des messages par téléphone ou par télécopie, bien que ce soit moins efficace car il faut établir la liaison séparément avec chaque destinataire.

Les centres d'alerte doivent communiquer par des moyens fiables et rapides leurs messages d'alerte aux tsunamis et autres informations connexes aux autorités compétentes de la zone relevant de leur responsabilité. Dans l'idéal, le système de communication des messages devrait permettre la diffusion et la réception rapides de textes ainsi que de graphiques (par exemple une carte des temps de parcours du tsunami) pour un coût raisonnable en tout point de la région du Pacifique, un même message étant simultanément envoyé à de nombreuses destinations, avec possibilité de signaler le caractère urgent des messages vitaux, de manière que les destinataires sachent qu'ils vont peut-être devoir prendre des mesures immédiates et que les principaux d'entre eux doivent envoyer un accusé de réception du message. Les méthodes et voies actuelles de transmission des messages ont, à degrés divers, ces caractéristiques, mais aucune n'est idéale. Les satellites, les réseaux à fibres optiques et le téléphone cellulaire offrent désormais de nombreuses méthodes nouvelles de communication. Il faut constamment les évaluer pour vérifier si elles peuvent résoudre les problèmes de communication des messages du TWSP, et les adopter s'il y a lieu.

Prévention

Ce type d'activités répond à la fois à l'évaluation des risques et aux alertes. Pour bien se préparer en cas d'alerte de l'arrivée imminente d'un tsunami, il faut connaître les zones susceptibles d'être inondées (cartes d'inondations dues aux tsunamis) et connaître le système d'alerte afin de savoir quand évacuer les populations et quand les laisser rentrer chez elles sans danger. Sans ces deux informations, les mesures prises risqueraient d'être insuffisantes et de ne pas atténuer l'impact du tsunami. Il est également indispensable que le public soit conscient de l'existence des tsunamis et en comprenne les dangers. Sauf si l'on a du temps, des ressources et les consignes nécessaires pour mener à bien une évacuation obligatoire forcée, faire quitter rapidement les zones inondables par la population afin de la mettre en sécurité exige qu'elle ait quelque notion du danger encouru. C'est particulièrement vrai dans le cas d'un tsunami généré localement pour lequel seules les secousses provoquées par le séisme avertiront la population. L'aménagement du territoire constitue un autre moyen de prévention, en implantant les installations essentielles telles que les écoles, les services de police et de lutte contre l'incendie, ainsi que les hôpitaux en dehors des zones inondables. Les travaux de génie civil visant à construire des structures qui résistent aux tsunamis, à protéger les immeubles existants et à créer des barrières pour se défendre des tsunamis,

comme par exemple des digues ou des brise-lames, sont aussi une forme de prévention.

Évacuation

Les plans et procédures d'évacuation sont généralement élaborés et appliqués au niveau local car ils exigent une connaissance détaillée des populations côtières et des installations menacées, ainsi que des ressources locales susceptibles de contribuer à résoudre le problème. Les tsunamis locaux ne laissent que peu ou pas de temps pour lancer une alerte officielle et peuvent aller de pair avec des dégâts dus aux séismes, tandis que les tsunamis en champ lointain peuvent laisser plusieurs heures pour se préparer avant l'arrivée des premières vagues. C'est pourquoi les préparatifs et les procédures d'évacuation sont différents dans ces deux cas.

La plupart des communautés côtières du Pacifique ne sont pas préparées à évacuer immédiatement les zones côtières de faible altitude après un séisme local tsunamigène. Il faut poursuivre les efforts afin d'établir des cartes d'inondation potentielle pour toutes les zones côtières peuplées menacées par des tsunamis locaux et pour apprendre aux populations menacées ce que sont les tsunamis locaux, les dangers qu'ils leur font courir et les mesures à prendre immédiatement pour sauver leur vie au cas où il s'en produirait un.

Évacuations à l'occasion de tsunamis locaux

Le seul signe annonciateur de l'imminence d'un tsunami local peut être la secousse du séisme, ou un comportement inhabituel de l'océan. Les personnes menacées doivent reconnaître les signes du danger qui les guette, puis se rendre immédiatement et rapidement à l'intérieur des terres et/ou en des lieux surélevés, étant donné que les vagues destructrices risquent de frapper dans les quelques minutes qui suivent, voire moins encore. Les personnes évacuées peuvent aussi se trouver confrontées aux effets du séisme, glissements de terrain, effondrements de bâtiments et de ponts, qui risquent d'entraver leur fuite. Pour que ce type d'évacuation rapide et non dirigée soit efficace, il faut que le public soit très conscient du danger et sache les risques que lui font courir les tsunamis. Les autorités doivent également procéder à une planification préalable afin de délimiter et de faire connaître les zones d'évacuation en cas de tsunami et les routes d'évacuation que l'on peut emprunter sans danger. Bien comprendre les risques imputables au tsunami et la zone qu'il va probablement inonder sont deux facteurs clés qui justifient de donner une éducation suffisante au public et de mettre au point des cartes et des procédures d'évacuation.

De nombreuses régions du Pacifique n'ont pas mis en place de procédures d'évacuation efficaces en cas de tsunamis lointains et parfois, les alertes ne parviennent pas aux communautés potentiellement en danger. Mais, même dûment alertés, les responsables des services de secours d'urgence ne connaissent souvent pas grand-chose aux tsunamis antérieurs ou modélisés, ni aux risques spécifiques imputables aux tsunamis, ou encore n'ont pas accès à ces informations, et ne disposent donc pas des éléments nécessaires pour prendre une décision d'évacuation. Il faut établir des cartes d'inondation potentielles en cas de tsunamis en champ lointain pour toutes les zones côtières menacées, notamment les centres urbains, industriels ou touristiques afin d'établir des plans d'évacuation. Les programmes d'enseignement sont eux aussi généralement insuffisants et l'organisation dans le passé d'évacuations inutiles peut également avoir sapé la confiance des gens dans le système. Il faut remédier à tous ces défauts pour effectuer des évacuations efficaces qui éviteront des pertes inutiles en vies humaines la prochaine fois que se produira un grand tsunami à l'échelle du Pacifique tout entier ou tout autre tsunami en champ lointain.



Matériel pédagogique relatif aux tsunamis et au TWSP produit et publié par les États membres du CIG/ITSU et la COI.

Évacuation en cas de tsunamis en champ lointain

En cas de tsunami en champ lointain, les autorités ont davantage de temps pour évacuer la population de manière organisée. Après avoir été notifiés par un

centre d'alerte de la formation d'un tsunami, et informés de l'heure d'arrivée prévue de la première vague, les responsables locaux des services d'intervention d'urgence décident si une évacuation se justifie. Leur décision repose sur la connaissance de données historiques ou de données fournies par un modèle quant aux menaces que peut faire courir aux côtes locales un tsunami provenant de la région source indiquée, et sur des indications concernant la gravité du tsunami ultérieurement fournies par le centre d'alerte à mesure que le phénomène se rapproche. Le public est informé du risque imminent et reçoit des instructions pour savoir comment et quand il doit évacuer les lieux ou où il doit se rendre. Des forces locales désignées d'avance, comme par exemple la police, les pompiers et la défense civile, contribuent à faire appliquer les ordres d'évacuation. Certaines dispositions visant à sauvegarder les biens peuvent également être prises, y compris l'envoi en haute mer de tous les bateaux et de toutes les embarcations, de même que des mesures visant à assurer la sécurité des installations industrielles situées à proximité de la mer. Pour que la prévention soit efficace, elle doit reposer sur des estimations de la zone potentiellement

inondable et des autres effets possibles d'un tsunami en champ lointain. Il faut définir les zones d'évacuation et les routes à emprunter, et apprendre au public en quoi consiste le risque de tsunami et quelles sont les procédures d'évacuation, afin que les gens ne choisissent pas de rester dans des zones dangereuses, de s'y rendre par curiosité ou encore de rentrer avant que le danger ne soit totalement passé. Pour que le public garde toute sa confiance dans le système, il faut autant que faire se peut éviter les évacuations inutiles.

Éducation

Pour parvenir à atténuer les effets des tsunamis, il faut impérativement que le grand public, les autorités locales et les décideurs comprennent mieux les caractéristiques des vagues de tsunamis, les dégâts et destructions qu'elles peuvent causer, et les mesures qu'il convient de prendre pour en atténuer les risques.

Éducation du public

Les États membres et les municipalités répondent très efficacement aux besoins éducatifs du grand public en tenant compte de la langue, de la culture, des coutumes locales, des pratiques religieuses, des relations avec les pouvoirs publics et de l'expérience antérieure des tsunamis.

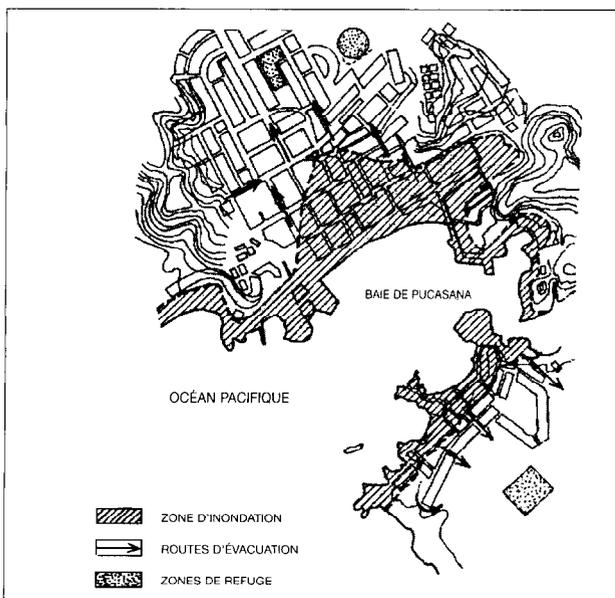
L'ITSU a mis au point et diffusé des matériels éducatifs pour aider et orienter les efforts locaux. Une brochure en couleurs, intitulée *Tsunami : les grandes vagues*, contient des informations générales sur les tsunamis et le danger qu'ils représentent, sur les

systèmes d'alerte, sur la recherche relative aux tsunamis et sur la marche à suivre en cas de tsunami. Une bande dessinée intitulée *Alerte aux tsunamis* contenant des informations analogues s'adresse aux jeunes enfants. Elle est accompagnée d'un manuel complémentaire à l'intention des enseignants et des élèves qui approfondit certaines questions essentielles.

La brochure et la bande dessinée sont publiées en anglais, mais leur présentation est en cours de modification, ce qui en facilitera la traduction et la publication dans d'autres langues. Le Chili a récemment publié pour les classes allant de la maternelle jusqu'à la fin du secondaire une série de quatre manuels en espagnol sur les séismes et les tsunamis, accompagnés de guides de l'enseignant. Ils ont ensuite été traduits en anglais par le Canada. Les deux séries sont désormais publiées et diffusées avec le soutien de l'UNESCO. De plus, le CIIT participe régulièrement aux efforts d'éducation du public en répondant par exemple aux questions émanant d'étudiants ou de particuliers intéressés par la question ; en fournissant des renseignements aux grands organes d'information, producteurs de télévision et de films documentaires, ainsi qu'aux écrivains ; en donnant des conférences publiques ; et en aidant d'autres organisations qui ont des programmes destinés à apprendre au public ce que sont les tsunamis. Le CIIT est également en train d'installer un site Web qui contiendra un large éventail d'informations sur les tsunamis intéressant le grand public ainsi que tous les responsables chargés d'atténuer les effets de ce phénomène. Certains États membres organisent également leurs propres programmes d'éducation du public au sujet des tsunamis.

Formation des opérateurs de systèmes d'alerte, des responsables des secours et des décideurs

Les opérateurs des systèmes d'alerte, les responsables des systèmes de secours et les décideurs ont eux aussi besoin d'apprendre à connaître les tsunamis parce que, proches ou lointains, il s'agit de phénomènes si rares sur certaines côtes que ces personnalités, qui occupent des postes clés, ont souvent trop peu, voire pas du tout, d'expérience antérieure et n'ont donc rien sur quoi se baser pour prendre des décisions quant aux préparatifs ou aux mesures à prendre lorsqu'un tsunami frappe leur pays ou leur région. Ils peuvent être presque entièrement tributaires des programmes de formation et/ou d'un accès facile à l'information sur les tsunamis en général, le danger particulier qui menace la région dont ils sont responsables, les systèmes d'alerte et les mesures d'atténuation des risques.



Carte d'inondation et d'évacuation de la ville côtière de Pucasana (Pérou).

L'ITSU a élaboré plusieurs programmes pour contribuer à répondre à ces besoins. Le Programme de formation d'experts invités, mené chaque année par le CIIT avec le soutien de la COI et l'aide du PTWC et d'autres organisations, enseigne à des scientifiques et ingénieurs de l'ensemble du bassin du Pacifique ce que sont la menace de tsunamis, les systèmes d'alerte et les moyens d'atténuation des effets du phénomène. Certains États membres organisent aussi des programmes de formation sur les risques naturels, y compris les tsunamis. Un Tsunami Newsletter (Bulletin sur les tsunamis), contenant des informations sur les derniers tsunamis qui ont eu lieu et sur les activités d'atténuation des risques, est publié par le CIIT et diffusé à l'échelon international à environ 1 000 personnes et bureaux ayant d'une manière ou d'une autre des responsabilités dans ce domaine. Le CIIT répond également à de fréquentes demandes d'information de la part des responsables de services de secours et des décideurs. Le site Web du CIIT sur les tsunamis fournira bientôt au monde entier un autre type d'accès aux informations pertinentes relatives à ce phénomène. La Base « experte » de données sur les tsunamis est également un excellent moyen pour avoir rapidement accès aux données historiques sur les tsunamis dans tout le Pacifique.

Une grande partie des populations menacées, ainsi que les responsables des secours d'urgence et les décideurs de leur région sont encore mal informés sur les tsunamis, les risques qu'ils font courir et les stratégies permettant d'en atténuer les effets. Étant donné que les programmes éducatifs sont généralement insuffisants et qu'ils sont extrêmement importants dans le cadre des efforts d'atténuation des risques, il conviendrait de continuer à leur accorder une attention toute particulière. Les programmes éducatifs devraient s'adresser aux résidents des zones côtières, aux visiteurs de ces mêmes régions (touristes), aux enseignants du primaire et du secondaire, aux représentants des grands organes d'information, aux opérateurs des systèmes d'alerte, aux responsables des services de secours et aux autorités. Ils devraient comprendre des conférences, des exercices sur la dynamique de groupe, des séminaires en situation réelle, des séminaires itinérants, des sites Web, des tableaux d'affichage électroniques, des auxiliaires pédagogiques audiovisuels, des dessins, des photos à afficher dans des lieux publics et à montrer à la télévision, des annonces radio et télédiffusées, des brochures et opuscules. Tout le matériel élaboré devrait être conçu de manière à être facilement traduit et adapté aux besoins du pays concerné. Il conviendrait également de fournir les informations concernant le risque de tsunamis à d'autres organisations chargées d'enseigner au public quels sont les risques naturels, en insistant sur l'importance de ces informations.

Aménagement du territoire

Plus la population mondiale augmente, plus le rythme de développement des zones côtières menacées s'accélère. Peut-être n'est-il pas possible d'éviter ce développement mais, pour éviter de mettre en danger des segments de population particulièrement vulnérables, certaines communautés ont choisi d'interdire la construction d'installations telles que les écoles et les cliniques dans les zones potentiellement inondables. L'installation d'autres services essentiels tels que la police et les pompiers ou les hôpitaux y a également été interdite. Il a en outre été demandé aux responsables d'infrastructures touristiques telles que les hôtels de front de mer de mettre en place des procédures d'évacuation en cas de tsunamis afin d'assurer la sécurité de leurs hôtes.

Le contrôle de l'aménagement du territoire a été largement sous-utilisé comme instrument d'atténuation des risques liés aux tsunamis. Il conviendrait d'encourager les gouvernements locaux à prendre toutes les mesures possibles pour éviter l'implantation de certaines installations dans les zones susceptibles d'être inondées en cas de tsunamis, et en particulier l'implantation de lieux de rassemblement ou d'installations mettant des enfants, des personnes âgées ou des personnes handicapées en danger. Les services essentiels tels que la police et les pompiers, ainsi que les hôpitaux, dont on aura besoin à la suite d'un tsunami, ne doivent pas non plus être situés dans des zones potentiellement inondables. Les installations industrielles susceptibles d'aggraver une catastrophe imputable à un tsunami en laissant fuir ou en répandant des matériaux inflammables ou dangereux devraient soit être renforcées contre le risque de tsunamis, soit situées en dehors des zones d'inondation. Les installations touristiques concentrent souvent à proximité du front de mer de nombreuses personnes qui n'ont parfois pas la moindre idée de ce qu'est un tsunami. Elles devraient donc obligatoirement mettre au point des procédures spéciales visant à informer et évacuer leurs hôtes en cas de tsunami.

Ingénierie

Certaines disciplines des sciences de l'ingénieur peuvent contribuer à atténuer les effets des tsunamis. Les constructions situées dans des zones à tsunamis peuvent être renforcées afin de résister aux forces dues à l'impact des vagues et des forts courants provoqués par les tsunamis. Les fondations peuvent être construites de manière à résister à l'érosion et au travail de sape des courants. Dans certains cas, le rez-de-chaussée des immeubles de front de mer peut être

ouvert afin de laisser passer l'eau, ce qui contribue à réduire le flux sortant excavateur tout autour du périmètre des fondations. On peut aussi construire les chambres d'hôtel uniquement au-dessus du premier étage, afin de réduire les risques pour les clients de l'hôtel qui ne connaissent peut-être pas les dangers inhérents aux tsunamis.

Les parties essentielles de l'infrastructure d'un bâtiment, générateurs de secours, central de distribution électrique, moteurs des ascenseurs par exemple, peuvent être installées à des étages qui ne risquent guère d'être inondés. Les objets lourds tels que les réservoirs de fuel qui risquent de partir à la dérive et de donner des coups de boutoir contre les murs peuvent être solidement ancrés au sol. Les systèmes de transport peuvent être construits ou modifiés de façon à faciliter une évacuation de masse rapide en dehors des zones d'inondation. Si la menace est grave et que les ressources sont suffisantes, il est possible de construire certains ouvrages de défense tels que digues, levées, brise-lames ou portes barrant

l'estuaire des rivières afin de repousser les tsunamis. D'énormes efforts de ce type ont été menés au Japon, en particulier le long de la côte de Sanriku. Ces mesures sont justifiées en grande partie par la connaissance des zones d'inondation potentielles et par les dégâts créés par les tsunamis précédents.

Dans la plupart des régions du Pacifique, très peu de mesures de génie civil ont été prises pour anticiper les effets des tsunamis. Certaines de ces mesures peuvent être simples, peu coûteuses et appliquées à des constructions existantes ou nouvelles. Il est préconisé aux gouvernements d'intégrer le « génie paratsunamique » dans les codes de construction. Il conviendrait également d'enseigner aux propriétaires immobiliers et aux chefs d'entreprise les mesures qu'ils peuvent prendre d'eux-mêmes pour protéger leurs investissements. Enfin, il faudrait, lorsqu'ils sont nécessaires et faisables, construire des ouvrages de défense afin de repousser les tsunamis.

Recherche

Bien qu'elle ne fasse pas directement partie des activités d'atténuation des risques, la recherche relative aux tsunamis n'en est pas moins indispensable pour améliorer ces activités. En effet, des travaux de recherche qui attestent l'existence de paléotsunamis, enrichissent une base de données historiques ou quantifient les effets d'un tsunami récent permettent d'évaluer les risques avec plus de précision. Tel est aussi le cas des travaux qui contribuent à parfaire la modélisation numérique des tsunamis. C'est grâce à la recherche que sont mises au point des techniques permettant aux systèmes d'alerte d'évaluer avec plus de rapidité et de précision le potentiel tsunamigène des séismes à partir des données sismiques. Et c'est aussi grâce à elle que se perfectionnent les techniques et instruments de mesure du niveau de l'eau utilisés pour prévoir l'impact des tsunamis en temps réel. La recherche permet en outre d'améliorer la conception des campagnes d'éducation destinées à tenir le public ainsi que le personnel chargé des opérations d'urgence informés de façon à ce qu'ils réagissent comme il faut en cas de besoin. Des travaux de recherche peuvent s'avérer nécessaires pour définir des procédures d'évacuation efficaces, compte tenu en particulier des risques supplémentaires que fait courir un tsunami engendré localement par un grand séisme. La recherche peut enfin guider

la planification de l'utilisation des terres dans les zones inondables et aider à concevoir des ouvrages et des installations qui résistent mieux aux tsunamis dans ces régions.

Structure

L'ITSU ne gère aucun programme de recherche en tant que tel et il n'existe aucun processus formel de coordination des recherches entre ses États membres. La plupart des travaux sur les tsunamis sont menés dans le cadre de programmes de recherche relevant de chaque État membre. Mais cette recherche suppose souvent d'importants efforts de collaboration et un vaste échange de données au niveau international. La réunion la plus importante pour la recherche scientifique sur les tsunamis est le Colloque sur les tsunamis organisé deux fois par an par la Commission de l'UGGI sur les tsunamis. La question des tsunamis figure aussi à l'ordre du jour de nombreuses autres réunions portant sur la géophysique, l'océanographie et l'atténuation des risques en général. En outre, des ateliers consacrés à tel ou tel aspect des tsunamis ou au problème des tsunamis dans telle ou telle région côtière sont souvent organisés. Des articles scientifiques sont publiés dans diverses revues spécialisées, dont la Science of Tsunami Hazards de la Tsunami Society. Le tableau d'affichage électronique sur les

tsunamis, service de diffusion électronique mis en place au point de départ par les États-Unis et géré maintenant par le CIIT pour le compte de l'ITSU, facilite la communication entre spécialistes des tsunamis dans le monde entier. Des informations brèves sur les tsunamis récents, les réunions à venir, les rapports de réunion et les publications récentes, sont également publiées par le CIIT pour le compte de l'ITSU avec le soutien de la COI dans le bulletin semestriel sur les tsunamis (Tsunami Newsletter). Enfin, un site Web sur les tsunamis, qui fournira des informations sur les besoins de recherche et les résultats de certains projets de recherche, est en cours de création au CIIT.

Domaines de recherche

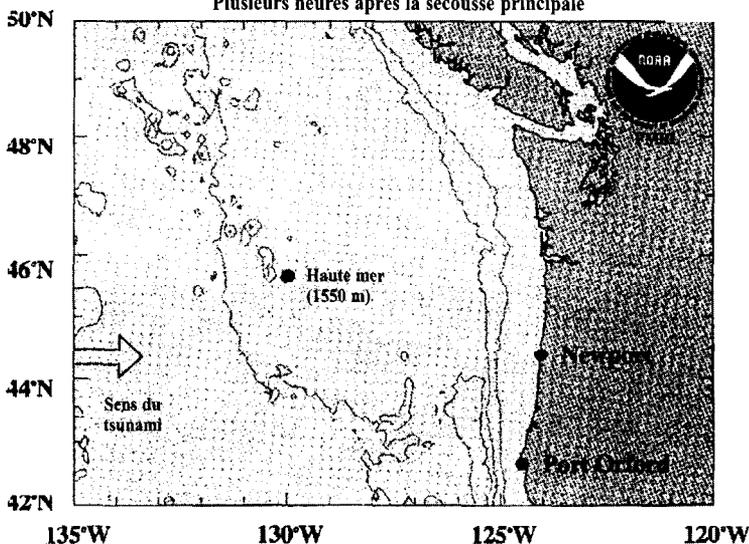
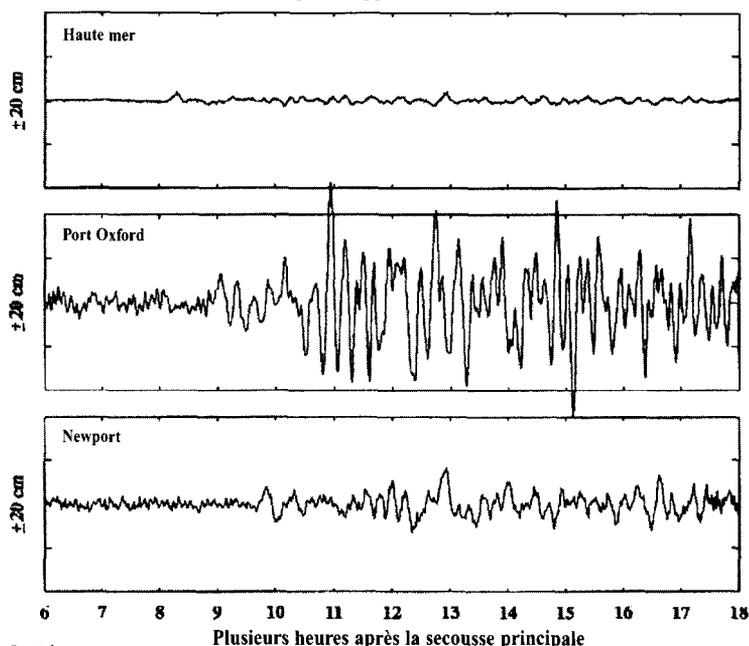
Les techniques actuelles de prévision des tsunamis en temps réel demeurent extrêmement limitées. Bien que l'éventualité d'un tsunami existe à chaque fois qu'un séisme superficiel de taille suffisante et obéissant à certain mécanisme se produit dans l'océan ou à proximité, la seule façon de s'en assurer consiste à détecter la présence des vagues à l'aide d'un réseau de stations de mesure du niveau de la mer ou à recueillir les observations fiables de témoins oculaires. On ne sait pas encore déterminer avec précision, à partir des données sismiques ou relatives au niveau de l'eau, l'étendue, l'amplitude ou l'histoire de la déformation du fond marin qui engendre un tsunami. En outre, on peut déterminer quand l'énergie initiale du tsunami atteindra la côte, mais on ne sait pas encore prévoir avec beaucoup de certitude la hauteur de la vague, le nombre de vagues, la durée du danger ou les forces que ces vagues vont déclencher, même avec des relevés de marégraphes situés entre la source et les zones en question.

On continue à mettre au point et à améliorer des modèles numériques permettant d'étudier le problème des tsunamis. Les modèles traditionnels aux différences finies sont utiles pour modéliser les vagues de tsunami en haute mer, mais ne conviennent généralement pas pour résoudre la géométrie et la bathymétrie côtières avec la précision voulue. Les modèles aux éléments finis, avec leurs mailles triangulaires irrégulières, permettent cependant d'obte-

nir la résolution nécessaire. Ces types de modèle devraient être utilisés pour calculer le déferlement (run up), les limites de l'inondation et les courants horizontaux concernant des événements dont la source est hypothétique ou connue. Il convient de tenir compte de l'interaction du tsunami avec les marées lorsque l'on détermine le niveau d'eau total et ses variations dans le temps pendant toute la durée de l'événement. L'information fournie par les modèles

Prévision des tsunamis

Exemple : Tsunami qui a frappé les îles Kouriles le 4 octobre 1994

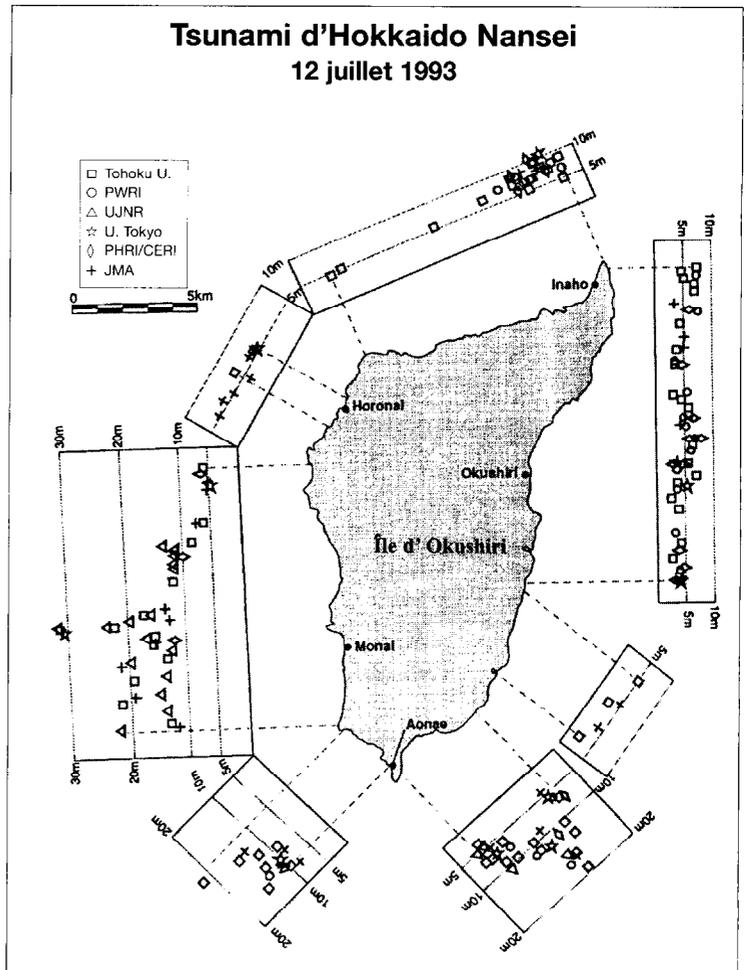


Les capteurs de pression fixés au fond donnent du tsunami une mesure plus directe que les marégraphes côtiers, et leurs signaux sont plus utiles pour prévoir l'impact de l'événement sur la côte. On voit ci-dessus des enregistrements, effectués en haute mer et près des côtes, du tsunami survenu récemment à Chikotane qui montrent qu'il peut y avoir des écarts importants entre signaux d'un même tsunami enregistrés par des marégraphes installés sur la côte à intervalle rapproché.

en ce qui concerne les courants horizontaux peut être utilisée pour calculer les forces qui s'exercent sur les ouvrages, et évaluer le risque dans les ports. Il faudrait en outre mettre au point des techniques pour exploiter des modèles en temps réel pendant les tsunamis afin d'aider les centres d'alerte et les gestionnaires des situations d'urgence à prévoir l'impact du phénomène.

Une modélisation préalable des signaux de tsunami sur les principaux instruments de mesure du niveau de la mer est nécessaire pour aider les centres d'alerte à évaluer plus vite et avec davantage de précision la gravité du tsunami. Par exemple, il existe une vingtaine de marégraphes disposés de façon très stratégique à l'intérieur et le long des bordures du bassin du Pacifique et le nombre des principales zones susceptibles d'être le point de départ d'événements à l'échelle du Pacifique est restreint. Des marégrammes théoriques combinant judicieusement les sources et les marégraphes serviraient de référence aux centres d'alerte pour évaluer les tsunamis éventuellement dévastateurs au fur et à mesure de leur progression dans le bassin du Pacifique.

Au cours des dernières années, quelques tsunamis exceptionnels (Nicaragua, 1992, Indonésie, 1994 et Pérou, février 1996) ont donné une nouvelle dimension à la recherche sur les tsunamis. Les amplitudes maximales de ces tsunamis sont beaucoup trop grandes par rapport à la taille du séisme à l'origine du phénomène. Les sismologues savent que l'échelle de magnitude des séismes fondée sur des vagues de surface d'une période de 20 secondes sature au-delà d'une valeur s'établissant à 8 environ et ne rend pas compte exactement de la taille des plus grands séismes. D'où peut-être la discordance évoquée plus haut. Mais même le moment sismique, paramètre plus représentatif de la taille du séisme qui est fondé sur des vagues sismiques de période beaucoup plus longue qui ne saturent pas, ne saurait semble-t-il expliquer pourquoi certains tsunamis affichent des amplitudes aussi grandes. L'idée a été émise que ces séismes appartiendraient à une catégorie particulière, celle des « séismes à tsunami » ou « séismes lents ». Le processus de rupture, qui ne dure que quelques secondes à plusieurs dizaines de secondes dans le cas d'un séisme ordinaire ou séisme rapide, dure ici une à plusieurs minutes et la faille peut être située très près du fond marin. Au cours de cette lente



Valeurs du déferlement (run up) du tsunami qui a frappé l'île d'Okushiri (Japon) la nuit du 12 juillet 1993.

rupture, il est fort possible qu'une proportion plus grande d'énergie sismique passe dans le tsunami alors que cette proportion n'est que de 10 % environ dans le cas d'un séisme normal. Nous ne disposons pas pour l'heure d'explication entièrement satisfaisante concernant ces tsunamis démesurément grands, mais c'est un domaine où les spécialistes devront approfondir les recherches.

Une autre question qui requiert l'attention des chercheurs est de savoir dans quelle mesure l'amplification due au phénomène de résonance contribue à expliquer le fait que le long des côtes des baies et des golfes les amplitudes des tsunamis soient si grandes alors qu'elles sont nettement plus faibles en d'autres lieux situés à proximité.

Pour de nombreuses régions du Pacifique, les archives sur les tsunamis sont très réduites, voire inexistantes. Des recherches visant à retrouver et à analyser la trace de paléotsunamis pourraient aider à remonter beaucoup plus loin dans l'histoire de ces

phénomènes dans certaines régions côtières pour mieux comprendre la menace qui pèse sur ces régions et d'autres voisines ainsi que peut-être sur l'ensemble de la région du Pacifique.

Applications récentes des résultats de la recherche

Il existe de nombreux exemples récents de contribution de la recherche à l'atténuation des effets des tsunamis. En voici quelques exemples :

Cartographie des inondations dues aux tsunamis : On dispose aujourd'hui d'une technologie permettant d'établir des cartes des inondations afin de parer aux situations d'urgence. Dans le cadre du Projet d'échange sur la modélisation des inondations dues aux tsunamis (TIME), soutenu par l'ITSU, de nombreux États membres ont pu se procurer un modèle d'inondation numérique conçu par le professeur Shuto du Japon et bénéficier d'une formation pour apprendre à s'en servir. Des scientifiques américains ont perfectionné la technique de cartographie des événements locaux en intégrant les autres effets des séismes (secousses telluriques, liquéfaction et glissements de terrain). Ces technologies offrent de nouveaux outils pour identifier les zones côtières menacées, et le degré de risque auxquelles elles sont exposées en cas de tsunami en champ local ou lointain.

Données relatives au déferlement (run up) des tsunamis : La précision des modèles évoqués plus haut dépend des observations recueillies et de leur comparaison avec les simulations numériques. Depuis 1992, il y a eu huit tsunamis destructeurs qui ont été étudiés par des scientifiques du monde entier. Les données recueillies lors de ces études ont livré une mine d'informations nouvelles sur la phase de déferlement (run up) de la dynamique du tsunami. Ces données sont maintenant utilisées pour valider et améliorer les modèles numériques.

Données sur les tsunamis en haute mer : Au contact des côtes et des ports, l'amplitude et la période des tsunamis sont transformées et modifiées par la bathymétrie et la topographie locales. Le signal

d'un tsunami enregistré par un marégraphe dans un port donne donc des informations qui ne suffisent pas pour prévoir l'impact du tsunami en d'autres endroits. Pour obtenir une prévision exacte, des mesures plus directes du tsunami en haute mer sont nécessaires. Un réseau de capteurs de pression mis au point récemment, qui envoient des relevés en temps réel, est en passe d'être déployé au large des côtes des États-Unis pour remédier à cette lacune.

Technologie relative au lieu et à la magnitude du séisme : La France a mis au point, à des fins d'alerte aux tsunamis, un système de station sismologique trois composantes large bande autonome, appelé TREMORS (Système d'évaluation en temps réel des risques de tsunamis par le moment sismique). Celui-ci estime rapidement et automatiquement l'emplacement du séisme, puis en calcule le moment sismique, meilleur moyen d'en estimer le potentiel tsunamigène. Le succès de TREMORS à Tahiti montre que d'autres pays pourraient utiliser cette technologie et des systèmes de ce type ont été installés récemment au Chili, en Indonésie, au Brunéi, au Pérou, en Corée, au PTWC, ainsi qu'au Portugal et en d'autres endroits de l'Europe.

Il faut poursuivre les recherches sur les tsunamis afin d'étayer et d'améliorer tous les éléments du processus d'atténuation des risques liés à ces phénomènes. Les États membres sont encouragés à soutenir tous les domaines de la recherche qui permettent de mieux comprendre le phénomène des tsunamis et d'en évaluer le risque, aident les centres d'alerte à réagir avec davantage de rapidité, de précision et de fiabilité, accroissent l'efficacité des programmes d'éducation et dotent les décideurs et les gestionnaires des situations d'urgence de meilleurs outils de préparation et de réaction. Les technologies nouvellement mises au point qui améliorent l'atténuation des risques doivent être appliquées aussi rapidement que possible.

CONCLUSIONS

Malgré les progrès importants accomplis ces dernières années pour améliorer le Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique (TWSP), il reste encore beaucoup à faire pour atténuer réellement les risques que ce phénomène, qu'il soit local ou lointain, présente dans toutes les régions du bassin du Pacifique. Les domaines essentiels pour améliorer le TWSP, sur lesquels l'ITSU doit faire porter ses efforts de façon prioritaire au cours des années à venir, sont les suivants :

- ◆ Cartes de déferlement (run up) – Utiliser les modèles numériques et les données historiques pour établir des cartes de déferlement potentiel qui serviront à évaluer les risques, à établir des plans et cartes d'évacuation et à stimuler d'autres activités essentielles d'atténuation des risques au niveau local incluant l'éducation du public, l'aménagement du territoire et les efforts de conception technique (génie paratsunami).
- ◆ Données historiques – Mettre les données historiques sous format numérique commun et concevoir des outils qui les rendent facilement accessibles aux individus et aux services qui en ont besoin à des fins de recherche et d'atténuation.
- ◆ Éducation aux tsunamis – Continuer à élaborer des matériels et des programmes pédagogiques permettant de mieux éduquer et sensibiliser le public, le personnel des centres d'alerte, les gestionnaires des situations d'urgence et les décideurs.
- ◆ Centres d'alerte – Établir de nouveaux centres d'alerte régionaux pour les tsunamis locaux dans les régions qui ne sont pas couvertes et mettre au point des technologies et des méthodologies pour améliorer la rapidité, la précision et la fiabilité de tous les centres d'alerte aux tsunamis.
- ◆ Instruments de mesure du niveau de l'eau – Améliorer la couverture stratégique des instruments de mesure du niveau de l'eau et la qualité des signaux qu'ils enregistrent à des fins à la fois de recherche et d'alerte.
- ◆ Actions opérationnelles – Les autorités, observatoires et centres d'alerte locaux doivent envoyer immédiatement leurs observations aux centres d'alerte nationaux, lesquels doivent immédiatement renvoyer ces informations au PTWC.
- ◆ Nouveaux tsunamis – Recueillir et archiver toutes les données marégraphiques ainsi que les mesures de déferlement (run up) et d'inondation après chaque grand séisme et/ou tsunami. L'absence de signal d'un tsunami sur un relevé est tout aussi importante et ce type de relevé doit également être sauvegardé.
- ◆ Communications – Se tenir au fait des nouveaux systèmes de communication susceptibles d'être plus efficaces pour le centre d'alerte et à d'autres fins et y avoir recours dans le cadre du TWSP le cas échéant.
- ◆ Recherche – Encourager et soutenir les activités de recherche – sur les tsunamis et toutes les questions y relatives – susceptibles d'améliorer l'atténuation des risques.

Les éléments essentiels du plan d'atténuation des effets des tsunamis – évaluation du risque, alerte, prévention et recherche – doivent être éminemment interactifs et bien coordonnés pour être efficaces. L'ITSU, en tant qu'organe de coordination de scientifiques, gestionnaires et planificateurs des situations d'urgence et responsables des centres d'alerte, comprenant des représentants de chaque pays concerné, remplit les conditions nécessaires pour assurer la mise en œuvre de ce plan avec succès.

REMERCIEMENTS

Nos remerciements vont à l'auteur, G.C. Dohler, ainsi qu'aux divers autres collaborateurs de la première édition de ce document. Le texte révisé de cette deuxième édition a été rédigé en plusieurs parties par divers auteurs, dont une équipe spéciale désignée à la seizième session de l'ITSU, composée de l'ancien directeur par intérim du CIIT, D. Sigrist, et des représentants de la France et du Mexique, et un groupe de rédaction désigné à la quinzième session, composé de H. Gorziglia, président de l'ITSU, C. McCreery, ancien directeur du CIIT, T. Murty, expert australien des tsunamis, et E. Bernard, représentant de la Commission de l'UGGI sur les tsunamis. Y. Sawada, correspondant national du Japon, a formulé de nombreuses remarques judicieuses et fourni des informations complémentaires. De nombreux autres États membres ont également eu l'obligeance de nous communiquer leurs observations par l'intermédiaire de leurs experts et correspondants nationaux. La version définitive a été revue à la réunion du Bureau de l'ITSU de janvier 1999, par H. Gorziglia, président de l'ITSU, F. Schindelé, vice-président de l'ITSU, S. Kim, correspondant national de la République de Corée, C. McCreery, directeur du PTWC, M. Blackford, directeur du CIIT, et I. Oliounine, secrétaire technique de la COI.

SIGLES

AFTN	Réseau du service fixe des télécommunications aéronautiques
AGSO	Australian Geological Survey Organization (Australie)
AOR	Zone de responsabilité
DHN	Dirección de Hidrografía y Navegación del Perú (Pérou)
ETDB	Base « experte » de données sur les tsunamis
ETOS	Système d'observation des séismes et des tsunamis
GMS	Satellite météorologique géostationnaire (Japon)
GOES	Satellite d'exploitation géostationnaire pour l'étude de l'environnement (États-Unis)
SMT	Système mondial de télécommunications
HTDB	Base de données historiques sur les tsunamis
GIC-ITSU	(ou ITSU) Groupe international de coordination du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique
INETER	Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (Nicaragua)
COI	Commission océanographique intergouvernementale
CIIT	Centre international d'information sur les tsunamis
ITSU	(ou CIG-ITSU) Groupe international de coordination du Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique
UGGI	Union géodésique et géophysique internationale
JMA	Office météorologique japonais (Japon)
KMA	Service météorologique de Corée (République de Corée)
NGDC	National Geophysical Data Center (États-Unis)
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (États-Unis)
NTF	National Tidal Facility (Australie)
NWS	Service météorologique national (États-Unis)
OSSO	Observatorio Sismológico del Suroccidente (Colombie)
PTWC	Centre d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique
SHOA	Service hydrographique et océanographique de la marine (Chili)
SNAM	Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (Chili)
TIME	Projet d'échange sur la modélisation des inondations dues aux tsunamis
TREMORS	Système d'évaluation en temps réel des risques de tsunamis par le moment sismique
TWSP	Système d'alerte aux tsunamis dans le Pacifique
UNESCO	Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture
WC/ATWC	Centre d'alerte aux tsunamis de la côte Ouest et de l'Alaska (États-Unis)
CMD-A	Centre mondial de données-A
OMM	Organisation météorologique mondiale